



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



**EVALUACIÓN DEL USO DE CENIZA DE FONDO Y CAL COMO
ADITIVO ESTABILIZANTE DE SUELO ARCILLOSO EN LA
SUBRASANTE DEL CAMINO VECINAL PALLALLA –
TOTOJIRA.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. AMÉRICO COLQUE ATENCIO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

EVALUACIÓN DEL USO DE CENIZA DE FONDO Y CAL COMO ADITIVO ESTABILIZANTE DE SUELO ARCILLOSO EN LA SUBRASANTE DEL CAMINO VECINAL PALLALLA – TOTOJIRA

AUTOR

AMÉRICO COLQUE ATENCIO

RECuento DE PALABRAS

29315 Words

RECuento DE CARACTERES

143655 Characters

RECuento DE PÁGINAS

142 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.9MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 25, 2024 1:03 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Oct 25, 2024 1:05 PM GMT-5

● **6% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 5% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Dr. Samuel Hualqui Castro
DOCENTE UNA - PUNO

V. O. B. ^o



28 OCTUBRE 2024

Ing. Jaime Medina Leiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 910545

Subdirector de Investigación
BIC



DEDICATORIA

A mis padres José y Nancy, quienes me ha brindado valiosas lecciones sobre la importancia del esfuerzo, la determinación en la búsqueda de mis sueños y también han impartido en mí valores invaluable, como la perseverancia, la comprensión y la empatía.

A mi hermano Jhunion, por su apoyo constante, sus palabras de aliento y su preocupación diaria por mi bienestar han sido un regalo invaluable.

Américo Colque Atencio



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por el regalo de la vida y las maravillas del universo.

Agradezco a mis jurados de tesis, por su orientación, tiempo y dedicación al revisar mi trabajo de investigación. Y a mi asesor, Ing. Samuel Huaquisto Cáceres, por la invaluable guía a lo largo del proceso de esta investigación.

A la prestigiosa Escuela Profesional de Ingeniería Civil, así como el personal docente y el equipo de laboratorio que contribuyeron en mi formación profesional. Deseo expresar mi más profundo agradecimiento.

Américo Colque Atencio



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2.1. Problema general.....	19
1.2.2. Problemas específicos	19
1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3.1. Hipótesis general.....	20
1.3.2. Hipótesis específicas	20
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	20
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.5.1. Objetivo general.....	22
1.5.2. Objetivos específicos	22

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1. ANTECEDENTES	23
2.2. MARCO CONCEPTUAL	27
2.2.1. Subrasante	27
2.2.2. Suelos de tipo arcilloso	28
2.2.2.1. Mecanismo de los suelos expansivos	28
2.2.3. Ceniza residual derivado de hornos de ladrilleras	30
2.2.3.1. Ceniza Volante	30
2.2.3.2. Ceniza de fondo.....	30
2.2.3.3. Temperatura del horno durante la cocción de ladrillos	31
2.2.4. Cal	34
2.2.4.1. Tipos de cal empleadas	34
2.2.4.2. Acción de la cal en suelos arcillosos	35
2.2.5. Estabilización de suelos	37
2.2.5.1. Estabilización mecánica	38
2.2.5.2. Estabilización por combinación	38
2.2.5.3. Estabilización química	39
2.2.6. Método del pH (Eades y Grim).....	40
2.2.7. Caracterización conforme a la normativa AASHTO	41
2.2.8. Caracterización según S.U.C.S.	42
2.2.9. Porcentaje de humedad	43
2.2.10. Granulometría de suelos.....	43
2.2.11. Límites de Atterberg	44
2.2.12. Ensayo de compactación de proctor modificado	46
2.2.12.1. O.C.H.	47
2.2.12.2. M.D.S.	47



2.2.13. Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)..... 47

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. GENERALIDADES.....	49
3.1.1. Método del estudio.....	49
3.1.2. Nivel del estudio	49
3.1.3. Diseño del estudio.....	49
3.2. MÉTODOS DE COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN	50
3.2.1. Técnicas	50
3.2.2. Instrumentos.....	50
3.3. UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	50
3.4. POBLACIÓN Y SELECCIÓN MUESTRAL	53
3.4.1. Población del estudio	53
3.4.2. Muestra del estudio	53
3.5. PROCEDIMIENTO.....	55
3.5.1. Obtención de la ceniza de fondo	55
3.5.2. Muestreo de material.....	56
3.5.3. Ensayo de porcentaje de humedad	58
3.5.4. Ensayo de granulometria.....	59
3.5.5. Método para estimar el porcentaje óptimo de cal según el pH.	60
3.5.6. Ensayo de límites de Atterberg (L.L. y L.P.).....	63
3.5.7. Ensayo de Proctor Modificado.....	66
3.5.8. Ensayo de CBR de laboratorio.....	69
3.6. VARIABLES DEL ESTUDIO	73
3.6.1. Ceniza de fondo (V.I.).....	73



3.6.2. Cal (V.I.)	73
3.6.3. Estabilización de suelos (V.D.).....	74
3.7. VALORACIÓN ESTADÍSTICA.....	74
3.7.1. Verificación de normalidad.....	74
3.7.1. Evaluación de hipótesis de correlación	75
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBRASANTE	78
4.1.1. Análisis Granulométrico	78
4.1.2. Humedad Natural	79
4.1.3. Límites de Consistencia (L.L. y L.P.).....	80
4.1.4. Clasificación.....	80
4.1.5. Perfil estratigráfico.....	82
4.2. PROPIEDADES DE PLASTICIDAD DE SUELOS ARCILLOSOS	83
4.2.1. Resultados de límite líquido de la subrasante arcillosa.....	83
4.2.2. Resultados del límite plástico de la subrasante arcillosa	84
4.2.3. Resultados del índice de plasticidad de la subrasante arcillosa	87
4.3. PROPIEDADES DE M.D.S. Y EL O.C.H. DE SUELOS ARCILLOSOS... 90	90
4.3.1. Resultados de la máxima densidad seca de la subrasante arcillosa	90
4.3.2. Resultados del óptimo contenido de humedad de la subrasante arcillosa.	92
4.4. ÍNDICE DE CAPACIDAD DE SOPORTE.....	98
4.5. PORCENTAJE DE EXPANSIÓN	101
4.6. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE LAS DOSIFICACIONES.....	107
4.7. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA CENIZA DE FONDO	115
4.8. CONTRASTE DE HIPÓTESIS.....	116



4.8.1. Pruebas de normalidad	116
4.8.1.1. Datos de la variable categórica (ordinal):	116
4.8.1.2. Datos de la variable numérica (continua):	117
4.8.2. Prueba de Hipótesis de Correlación para el I.P.....	118
4.8.3. Prueba de Hipótesis de Correlación para la M.D.S. y el O.C.H.	119
4.8.4. Prueba de Hipótesis de Correlación para el CBR	121
4.9. DISCUSIÓN CON ANTECEDENTES.....	122
V. CONCLUSIONES.....	130
VI. RECOMENDACIONES	133
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134
ANEXOS.....	140

ÁREA: Geotecnia Vial

TEMA: Tratamiento de subrasante arcillosa

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Transportes y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 07 de noviembre del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Categorías de Sub rasante	27
Tabla 2 Asociación entre el hinchamiento y el L.L.	29
Tabla 3 Expansividad del suelo en función del potencial de hinchamiento	29
Tabla 4 Categorización de suelos basado en el I.G.	42
Tabla 5 Clasificación de suelos conforme al I.P.	45
Tabla 6 Elección del método según norma ASTM D 1557	46
Tabla 7 Características de cada método según norma ASTM D 1557	46
Tabla 8 Propiedades de la muestra patrón	47
Tabla 9 Datos básicos del camino vecinal en estudio.....	52
Tabla 10 Georreferenciación de los puntos de exploración.....	52
Tabla 11 Especificación del tamaño muestral	54
Tabla 12 Registro de los valores de pH para suelo CL y CH	62
Tabla 13 Interpretación del coeficiente de Spearman.....	77
Tabla 14 Resultados del porcentaje del peso pasante para cada malla	78
Tabla 15 Contenidos de humedad en los suelos de subrasante en estudio	79
Tabla 16 Resultados del L.L., L.P. e I.P. de los suelos de subrasante	80
Tabla 17 Clasificación de suelos.....	81
Tabla 18 Variación del L.L. en suelos CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal..	83
Tabla 19 Variación del L.L. en suelos CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal .	84
Tabla 20 Variación del L.P. en suelos CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal..	85
Tabla 21 Variación del L.P. en suelos CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal..	85
Tabla 22 Valores del I.P. en suelos CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal	88
Tabla 23 Valores del I.P. en suelos CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal	89



Tabla 24	Valores de la M.D.S. en CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal.....	91
Tabla 25	Valores de la M.D.S. en CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal	91
Tabla 26	Valores del OC.H. en CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal.....	92
Tabla 27	Valores del O.C.H. en CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal	93
Tabla 28	Valores de la M.D.S. vs O.C.H. del suelo CL y CH.....	97
Tabla 29	CBR al 95% y al 100% del suelo CL con ceniza de fondo y cal.....	98
Tabla 30	CBR al 95% y al 100% del suelo CH con ceniza de fondo y cal	99
Tabla 31	Grado de expansión del suelo CL (M-1) con ceniza de fondo y cal.....	102
Tabla 32	Grado de expansión del suelo CL (M-2) con ceniza de fondo y cal.....	103
Tabla 33	Grado de expansión del suelo CH (M-1) con ceniza de fondo y cal	104
Tabla 34	Grado de expansión del suelo CH (M-2) con ceniza de fondo y cal	105
Tabla 35	Costo estimado por m3 del suelo CL con ceniza de fondo y cal	109
Tabla 36	Costo estimado por m3 del suelo CH con ceniza de fondo y cal.....	110
Tabla 37	Prueba de normalidad de las dosificaciones (variable categórica)	117
Tabla 38	Prueba de normalidad de los resultados de ensayos (variable numérica). 118	
Tabla 39	Prueba de hipótesis para los resultados del I.P.	119
Tabla 40	Prueba de hipótesis para los resultados de la M.D.S. y O.C.H.....	120
Tabla 41	Prueba de hipótesis para los resultados del CBR.....	122



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Encogimiento e hinchamiento de suelos arcillosos expansivos	28
Figura 2 Acumulación de ceniza de fondo en hornos de ladrilleras en Salcedo	31
Figura 3 Ubicación de los termopares instalados por niveles en el horno.....	32
Figura 4 Curvas de temperatura en cada nivel del horno	33
Figura 5 Evolución de la temperatura en el horno (superior, media e inferior)	34
Figura 6 Proceso de reacción puzolánica entre la cal y los minerales arcillosos.....	36
Figura 7 Estabilización de suelos	38
Figura 8 Reacción química entre el suelo y cal	40
Figura 9 Carta de plasticidad	43
Figura 10 Límites de Atterberg.....	44
Figura 11 Localización política de la zona estudiada	51
Figura 12 Ubicación del camino vecinal y puntos de exploración	51
Figura 13 Recolección de ceniza de fondo de los hornos de ladrilleras	56
Figura 14 Excavación de calicatas con maquinaria	57
Figura 15 Ensayo de análisis granulométrico	60
Figura 16 Registro del pH en suelo tratado con cal.....	61
Figura 17 Efecto del contenido de cal sobre el valor de pH del suelo tratado	63
Figura 18 Instrumentos para realizar el ensayo de L.L. y L.P.....	65
Figura 19 Muestras ensayas para determinar el L.L. y el L.P.	66
Figura 20 Patrón para la compactación en moldes de 4 pulg.	68
Figura 21 Proceso de compactación del ensayo	69
Figura 22 Instrumentos para realizar las pruebas de CBR en laboratorio	71
Figura 23 Proceso de compactación para el ensayo de CBR en laboratorio	71



Figura 24	Inmersión de los moldes de CBR en agua.....	72
Figura 25	Perfil estratigráfico del camino vecinal Pallalla - Totojira	82
Figura 26	L.L. y L.P. del suelo CL con ceniza de fondo y cal	86
Figura 27	L.L. y L.P. del suelo CL con ceniza de fondo y cal	87
Figura 28	I.P. del suelo CL con adición de ceniza de fondo y cal.....	88
Figura 29	I.P. del suelo CH con adición de ceniza de fondo y cal	89
Figura 30	I.P. promedio en suelos CL y CH con ceniza de fondo más cal	90
Figura 31	Registro de curvas de compactación del suelo CL.....	94
Figura 32	Registro de curvas de compactación del suelo CH	95
Figura 33	Decremento de la M.D.S. del suelo CL y CH.....	96
Figura 34	Incremento del O.C.H. del suelo CL y CH	96
Figura 35	Variación de los parámetros de compactación con ceniza y cal	97
Figura 36	Resultados del CBR para el suelo CL con ceniza de fondo y cal	99
Figura 37	Resultados del CBR para el suelo CH con ceniza de fondo y cal.....	100
Figura 38	Variación del CBR en los suelos CL y CH con ceniza de fondo y cal ...	101
Figura 39	Variación de las expansiones en el suelo CL (M-1).....	102
Figura 40	Variación de las expansiones en el suelo CL (M-2).....	103
Figura 41	Variaciones de las expansiones en el suelo CH (M-1).....	104
Figura 42	Variaciones de las expansiones en el suelo CH (M-2).....	105
Figura 43	Expansiones promedio en suelo CL y CH con ceniza de fondo y cal.....	106
Figura 44	Relación Costo-Beneficio para el I.P.	111
Figura 45	Relación Costo-Beneficio para el CBR.....	113
Figura 46	Relación Costo-Beneficio para el grado de expansión.....	114
Figura 47	Análisis Químico de la ceniza de fondo.....	115



ACRÓNIMOS

SUCS:	Soil Unified Classification System (traducido al español: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)
AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials (traducido al español: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transportes)
IP:	Índice de Plasticidad
LL:	Límite Líquido
LP:	Límite Plástico
OCH:	Óptimo Contenido de Humedad
MDS:	Máxima Densidad Seca
CBR:	Relación de Soporte California
CF:	Ceniza de fondo
C:	Cal
CL:	Arcillas de baja plasticidad
CH:	Arcillas de alta plasticidad
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
r_s:	Coefficiente de correlación de Spearman
ASTM:	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales



RESUMEN

Los suelos arcillosos debido a su baja capacidad portante los hacen inadecuados para la infraestructura vial. Este estudio tiene como objetivo principal determinar cómo la incorporación de la ceniza de fondo (proveniente de hornos de ladrilleras en Salcedo) y cal podría mejorar la estabilidad del suelo de la subrasante arcillosa del camino vecinal Pallalla – Totojira, en el distrito de Platería, Puno. Se evaluaron adiciones de 3%, 6%, 9% y 12% de ceniza de fondo y 3% de cal. Se validó la mejora de las propiedades físicas y mecánicas mediante ensayos de laboratorio, que incluyeron: límites de consistencia, proctor modificado, CBR y el porcentaje de expansión. La investigación emplea el método científico, con un nivel descriptivo y un diseño experimental. La población está constituida por el suelo de subrasante del camino vecinal, se seleccionaron muestras de las calicatas C-02 y C-03, identificadas como CL y CH respectivamente, según el perfil estratigráfico. Los resultados indican que la adición de ceniza de fondo y cal actúa como un aditivo estabilizador, mejorando significativamente las características del suelo estudiado. Para la calicata C-02 (CL), la dosificación óptima fue S88-CF9-C3, se obtiene un I.P. de 7.1, una M.D.S. de 1.732 g/cm³, un CBR de 20.6% y un grado de expansión de 1.13%. Para la calicata C-03 (CH), la dosificación óptima fue S85-CF12-C3, se consigue un I.P. de 8.8, MDS de 1.667 g/cm³, CBR de 11.7% y un grado de expansión de 2.44%. Estos aditivos resultaron ser más efectivos en suelos CL que en suelos CH.

Palabras clave: Arcilla, Cal, Ceniza de fondo, Dosificación, Subrasante.



ABSTRACT

Clay soils, due to their low bearing capacity, make them unsuitable for road infrastructure. The main objective of this study is to determine how the incorporation of bottom ash (from brick kilns in Salcedo) and lime could improve the stability of the clayey subgrade soil of the Pallalla - Totojira local road, in the Platería district, Puno. Additions of 3%, 6%, 9% and 12% bottom ash and 3% lime were evaluated. The improvement of the physical and mechanical properties was validated through laboratory tests, which included: consistency limits, modified proctor, CBR and the percentage of expansion. The research uses the scientific method, with a descriptive level and an experimental design. The population is made up of the subgrade soil of the local road, samples were selected from the C-02 and C-03 test pits, identified as CL and CH respectively, according to the stratigraphic profile. The results indicate that the addition of bottom ash and lime acts as a stabilizing additive, significantly improving the characteristics of the soil studied. For pit C-02 (CL), the optimal dosage was S88-CF9-C3, obtaining an I.P. of 7.1, an M.D.S. of 1,732 g/cm³, a CBR of 20.6% and a degree of expansion of 1.13%. For pit C-03 (CH), the optimal dosage was S85-CF12-C3, obtaining an I.P. of 8.8, MDS of 1,667 g/cm³, CBR of 11.7% and a degree of expansion of 2.44%. These additives were found to be more effective in CL soils than in CH soils.

Keywords: Clay, Lime, Bottom ash, Dosage, Subgrade.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los suelos con arcillas presentan una reducida capacidad de carga por lo que no son apropiados para su utilización obras de infraestructura de las redes viales, según la normativa (manual de suelos y pavimentos), en caso que se tenga subrasantes con CBR < 6% se procederá a estabilizar, reemplazar, elevar el nivel de subrasante o cambiar el trazo vial según la naturaleza del suelo, por lo que abre una ventana hacia diferentes formas de mejoramiento del suelo eligiéndose la más viable.

En ese contexto este trabajo de investigación titulado “Evaluación del uso de ceniza de fondo y cal como aditivo estabilizante de suelo arcilloso en la subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira” se realizó con la intención de evaluar el comportamiento de la ceniza de fondo (obtenido de hornos de ladrilleras en el centro poblado de Salcedo) y la cal para ser empleada como aditivo estabilizante de la subrasante arcillosa de dicho camino vecinal objeto de estudio, los diferentes ensayos realizados se llevaron a cabo en los ambientes del laboratorio del área de geotecnia de la E. P. Ingeniería Civil, el procedimiento de dichos ensayos se hicieron según directrices del MTC y normas internacionales como la ASTM .

Con el propósito de facilitar la comprensión, se desglosa la siguiente estructura para el presente estudio:

En el capítulo uno se expone el problema de investigación, la hipótesis planteada del estudio, la justificación del estudio y los objetivos correspondientes.



En el capítulo segundo se aborda la inspección literaria, aquí se encuentra los antecedentes nacionales y locales que orientaron la investigación, así mismo se presenta el marco conceptual detallando las bases teóricas necesarias.

En el capítulo tercero se contempla la metodología empleada para el desarrollo del estudio, se detalla las técnicas y/o instrumentos de obtención de información, así como la población y muestra del estudio, procedimientos por cada ensayo requerido, las variables que intervienen y una valoración estadística de los resultados que se obtuvieron.

En el capítulo cuarto se presentan los datos hallados de la caracterización del suelo natural de la subrasante (perfil estratigráfico), los resultados de los aspectos tanto físicas como mecánicas de la subrasante arcillosa adicionando ceniza de fondo y cal, el análisis económico de las dosificaciones empleadas, el análisis químico de la ceniza de fondo y la verificación de las hipótesis formuladas.

Por último, se presenta las conclusiones obtenidas, sugerencias plantadas, así como la bibliografía y los respectivos anexos.

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Para el departamento de Puno es prioridad mejorar la infraestructura vial, porque aumenta la conectividad regional, se impulsa el turismo, se mejora la seguridad vial y promueve un desarrollo económico y social. Estos aspectos contribuyen al desarrollo de la región.

En la zona de estudio, el camino vecinal Pallalla – Totojira, se tiene la problemática que la vía está conformada principalmente por suelos arcillosos y en temporada de lluvia se presenta elevados porcentajes de saturación producto de las constantes lluvias y bofedales existentes, estos factores ocasionan que el suelo reduzca



sus propiedades físico-mecánicas impidiendo el empleo en óptimas condiciones a nivel de subrasante del pavimento, a esto se suma la existencia de muchos hornos de ladrilleras en el centro poblado de Salcedo, las cuales generan dos tipos de ceniza, cenizas volantes, más ligeras y generalmente permanecen en el aire; y ceniza de fondo, más pesada y es considerada como desperdicio. Además, es muy conveniente mejorar dicho suelo arcilloso empleando agentes estabilizantes que promuevan la reutilización de ese insumo, es una opción alternativa pues disminuye el impacto negativo en el medio ambiente.

En este escenario resulta imprescindible proponer alguna solución al desempeño inadecuado de la subrasante con arcillas, debido a lo cual el presente estudio surge para crear información sobre la incorporación de ceniza de fondo y cal a suelos arcillosos para su uso como subrasante mejorada en el camino vecinal Pallalla – Totojira.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

- ¿Cómo la incorporación de ceniza de fondo y cal podría mejorar la estabilidad de la subrasante arcillosa del camino vecinal Pallalla – Totojira?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera se modifica las propiedades de plasticidad del suelo arcilloso a nivel de subrasante adicionando ceniza de fondo y cal?
- ¿Cuánto cambia las propiedades de densidad seca máxima del suelo arcilloso a nivel de subrasante adicionando ceniza de fondo y cal?
- ¿Cuánto se modifica el valor de soporte relativo del suelo arcilloso a nivel de subrasante adicionando ceniza de fondo y cal?



1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

- La incorporación de ceniza de fondo y cal influye de forma positiva para la estabilización de la subrasante arcillosa, por lo que es viable para su uso en el camino vecinal Pallalla – Totojira.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La adición de ceniza de fondo y cal mejora las propiedades de plasticidad del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.
- La adición de ceniza de fondo y cal influye en la máxima densidad seca (MDS) y al contenido de humedad óptimo (CHO) debido a la adición de insumos con características diferentes al suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.
- La adición de ceniza de fondo y cal modifica positivamente la capacidad portante del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La investigación y desarrollo con nuevos materiales de construcción para mejoramiento de suelos arcillosos promueve avances científicos en la ingeniería vial y la posible aplicación de tecnologías más eficientes y sostenibles en la construcción de caminos. La investigación conduce a mejoras significativas en la calidad y vida útil de los caminos en general en beneficio del desarrollo del país.



El mejoramiento del camino vecinal Pallalla – Totojira permitirá un transporte más eficiente de productos agrícolas, bienes y servicios; lo que facilita la participación en los mercados locales y regionales generando de esta forma un incremento en los ingresos y mejora en la calidad de vida. Además, se promueve la generación de empleo y oportunidades económicas en la zona de estudio pues se requiere contratar trabajadores para la construcción y su posterior mantenimiento de la vía tratada.

En este marco es prioritario para el departamento de Puno mejorar dicha infraestructura vial, porque aumenta la conectividad regional, se impulsa el turismo, se mejora la seguridad vial y promueve un desarrollo económico y social, así mismo un camino mejorado permite una conducción más eficiente y reduce el consumo de combustible de los vehículos reduciendo las emisiones contaminantes.

Con respecto a las cenizas de fondo de los hornos de ladrilleras según la Ley general de salud del Perú (Ley N°26842, 1997), debido a la categoría artesanal de esta industria, la disposición final de estos residuos no es ambientalmente adecuado, resultando en impactos negativos en la salud de las poblaciones cercanas a los centros de producción. Ante esta situación, surge la importancia de que los residuos generados de las actividades en los hornos de ladrillos deban ser eliminados adecuadamente.

Para el presente trabajo de investigación la ceniza de fondo (derivada de la producción de ladrillos en el centro poblado de Salcedo) será reciclada, de esta forma se tiene la propuesta de un diseño y construcción más amigables con el medio ambiente gracias al gestión adecuada de residuos.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de la ceniza de fondo y la cal para ser empleada como aditivo estabilizante de la subrasante arcillosa del camino vecinal Pallalla – Totojira.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar de qué modo afecta las propiedades de plasticidad del suelo arcilloso a nivel de subrasante adicionando ceniza de fondo y cal del camino vecinal Pallalla – Totojira.
- Determinar cómo cambia las propiedades de densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo del suelo arcilloso a nivel de subrasante adicionando ceniza de fondo y cal del camino vecinal Pallalla – Totojira.
- Determinar cómo se modifica el valor de soporte relativo del suelo arcilloso a nivel de subrasante adicionando ceniza de fondo y cal del camino vecinal Pallalla – Totojira.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Villanueva (2023) en el desarrollo de su tesis plantea como objetivo evaluar el uso de las cenizas de carbón, provenientes de las ladrilleras de la victoria, como un aditivo para suelos arcillosos con aplicación en pavimentos. Se analiza las consecuencias de la incorporación de dicha ceniza al suelo arcilloso en estudio, se realizó 6 exploraciones a cielo abierto para el estudio de mecánica de suelos, luego se emplea dosificaciones de 5%, 10%, 15% y 20% de ceniza de carbón. Concluye que adicionando un 10% de ceniza se obtiene una M.D.S. de 1.688 g/cm³ y un O.C.H. de 14.77%, con respecto al valor de CBR aumenta de 3.80% a 7.60%, también se aprecia que a medida que se adiciona porcentajes mayores a 15% de ceniza el CBR decrece de valor, por lo que sugiere una nueva alternativa en el ámbito de la construcción agregando porcentajes del aditivo en un rango de 10 a 15%.

Livise (2023) en su trabajo de tesis se concentra en la conducta de las propiedades mecánicas del suelo de la cantera de Alto Puno, su objetivo general es determinar la óptima proporción y porcentaje de cal, a fin de estabilizar el suelo agregando cal para el mejoramiento del valor relativo de soporte de la subbase de la progresiva km. 08+000 a la progresiva km 10+000 de la carretera Puno – Mañazo, se determinó que el CBR pasó de tener 30% a valores de 73%, 104%, 80% y 71% para dosificaciones de 2%, 4%, 6% y 8% de cal respectivamente, así mismo se concluye que la proporción óptima es de 4% de cal para un CBR de 104%.



Vilcas de la Cruz (2022) en su tesis de pregrado establece como objetivo general: Evaluar la estabilización de suelos arcillosos adicionando ceniza de ladrillo en vías no pavimentadas, el método general fue el científico y el tipo de investigación fue explicativo experimental, el lugar de estudio corresponde al suelo de subrasante de la avenida Próceres del distrito de Chilca, el tipo de muestreo empleado fue no probabilístico intencional realizado calicatas en dicha avenida y las dosificaciones estudiadas fueron de 10%, 20% y 30% de la ceniza en mención. Se concluye que en carreteras que no tengan pavimento la incorporación de ceniza de ladrillo si mejora los suelos arcillosos, cuando su porcentaje es 30% en relación al peso seco, la M.D.S. se aumenta de 1.86 g/cm³ a 2.00 g/cm³; mientras que el O.C.H. se reduce de 11.11% a 9.38%, el CBR al 95% pasó de 4.60% a 20.83% y el CBR al 100% pasó de 4.93% a 22.87%.

Choquecota (2022), este trabajo de investigación utiliza el método de estudio experimental de tipo aplicado, tiene la finalidad de determinar cómo la incorporación de ceniza de thola podría mejorar la subrasante de una trocha carrozable del centro poblado de Chua Chua – comunidad de Ancaruyo Riva, ubicado en el distrito de Zepita; para ello se empleó dosificaciones de 6%, 9%, 12% y 15% de la ceniza de thola, la caracterización del suelo corresponde a una arcilla arenosa de baja plasticidad, se concluye que el índice de plasticidad óptimo fue de 8%, con respecto al ensayo proctor la máxima densidad seca adecuada es de 1.727 g/cm³ y para el ensayo de CBR se obtiene un valor apropiado de 18.1% en el suelo de subrasante estudiado.

En su estudio investigativo Delgado y Mormontoy (2021) pretende demostrar que se pueden mejorar las propiedades de un suelo arcilloso mediante la adición de cal como agente estabilizador principal y cenizas de mazorca de maíz como agente estabilizador secundario, las dosificaciones empleadas son las siguientes: 1% de CMM, 2% de CMM y 3% de CMM incorporando 5% de cal de forma constante en todas las dosificaciones,



determina que la mejor dosificación es 3% de CMM + 5% de cal donde el valor de la densidad máxima seca llega a ser 1.725 g/cm³ y el CBR a un valor de 12.84%, triplicándose de esta manera su valor inicial respecto al suelo natural. Concluye que las cenizas volantes son complementa de forma positiva a la cal en casos que se tengan arcillas.

En el desarrollo de su tesis Vargas (2020) evalúa la estabilización de un suelo arcilloso con ceniza volcánica para el mejoramiento de una subrasante en el camino vecinal Asiruni – Rosaspata, Huancané. La investigación usó el método de tipo cuasi experimental añadiendo ceniza de origen volcánico en mezclas variadas de 15%, 20% y 25% con respecto al peso del suelo seco, dicha ceniza fue extraída del volcán Sabancaya, se tiene que la caracterización del suelo corresponde al tipo CL y al combinarse con el insumo tratado el I.P. varia de 14.85% a 9.08%, las propiedades de expansión mejora de 1.074% a 0.304%, también determina que añadir un 20% de ceniza volcánica es el más optimo, incrementado el CBR en un 61.02% en base a la muestra patrón.

Ayala et al. (2019) en su artículo de investigación presenta los resultados del uso de ceniza de ladrilleras artesanales (considerado como un material residual disponible y no aprovechado) en subrasantes arcillosas, para ello se dosificó 10%, 20%, 30% y 40% de ceniza. Las muestras estudiadas revelan la existencia de SiO₂, lo que facilita la reacción de la ceniza con los suelos arcillosos estudiados. Establece que con la adición de 20% de CFLA el CBR mejora de 2.2% a 9.5% también concluye que para dosificaciones mayores a 20% el valor de CBR tiende a disminuir, con respecto a la expansión decrece de 4.6% hasta llegar a un valor de 1.1% para 20% de CFLA y 0.74% para un porcentaje de 40% de CFLA.



Huancoillo (2017) en su estudio investigativo designa como objetivo general analizar las propiedades mecánicas del suelo estabilizado con el uso de ceniza volante y cal para la base de la carretera afirmada Dv. Huancané – Chupa, la caracterización del suelo corresponde al tipo SC (arenas arcillosas) y las dosificaciones que emplea para su trabajo de tesis son 5%, 15% y 25% de ceniza volante más 5% de cal en todas las mezclas. Determina que con la combinación propuesta 90% de S.N. más un 5% de la ceniza objeto de estudio y 5% de cal de obra, se tiene que para la propiedad de plasticidad se redujo al 4% y la expansividad al valor de 0.13%, mejorando de esta forma estos parámetros con respecto al suelo natural, para dosificaciones mayores a 10% de ceniza volante el I.P. prácticamente no varía y el CBR empieza a decrecer paulatinamente. Se llega a la conclusión que las propiedades mecánicas si van a mejorar cuando se añade tales aditivos.

Altamirano y Díaz (2015) en su trabajo de investigación establece como objetivo poder lograr mejorar las propiedades de los suelos que sean cohesivos mezclándolo con cal hidratada, para ello se trabajó con 4 tipos de dosificaciones: 3%, 6%, 9% y 12% de cal, se realizaron 4 exploraciones a cielo abierto en las cuales se catalogaron su color, textura y la clasificación del suelo tratado. Para las mezclas se estableció que agregando un nueve por ciento de la cal hidratada se hallaban los resultados más óptimos, se obtuvieron los siguientes valores para el suelo natural y el suelo estabilizado respectivamente: el L.L. pasó de 54% a 44%, el I.P. se modificó de 26% a 9%, con respecto al CBR mejoró de 16.28% a 57.2% y para la expansión disminuyó de 7.9% a 3.1% evidenciando que se logra una mejora considerable en estas propiedades estudiadas.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Subrasante

La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, está construida por un material de suelos seleccionados que cumplan las características adecuadas y que es compactado en distintas capas para construir un cuerpo estable en óptimo estado. (Aguilar & Bravo, 2020)

La capacidad de soporte, junto con el tránsito y las características de los materiales que serán utilizados en la construcción de la superficie de rodadura, conforman las variables básicas para tener un buen diseño de la estructura del pavimento que es colocado encima. (Aguilar & Bravo, 2020)

Según MTC (2014) Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos, lo define como la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se colocará la estructura del pavimento o afirmado, además establece categorías de la subrasante en función del valor del CBR, se muestra los rangos en la siguiente tabla.

Tabla 1

Categorías de Sub rasante

Categorías de Sub rasante	CBR
S0: Sub rasante inadecuada	CBR < 3%
S1: Sub rasante insuficiente	De un CBR \geq 3% a un CBR < 6%
S2: Sub rasante regular	De un CBR \geq 6% a un CBR < 10%
S3: Sub rasante buena	De un CBR \geq 10% a un CBR < 20%
S4: Sub rasante muy buena	De un CBR \geq 20% a un CBR < 30%
S5: Sub rasante excelente	De CBR \geq 30%

Nota. Extraído del Manual de Carreteras – Sección Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (MTC, 2014).

2.2.2. Suelos de tipo arcilloso

Según Abdi y Ghobadi (2013) señala que “Los suelos con arcillas suelen ser rígidos en estado seco, pero pierden dicha rigidez cuando se saturan con agua.” Así mismo indican que “La reducción de la resistencia y la rigidez de las arcillas provoca una pérdida de la capacidad de carga y un asentamiento excesivo, lo que provoca graves daños a la estructura del pavimento”.

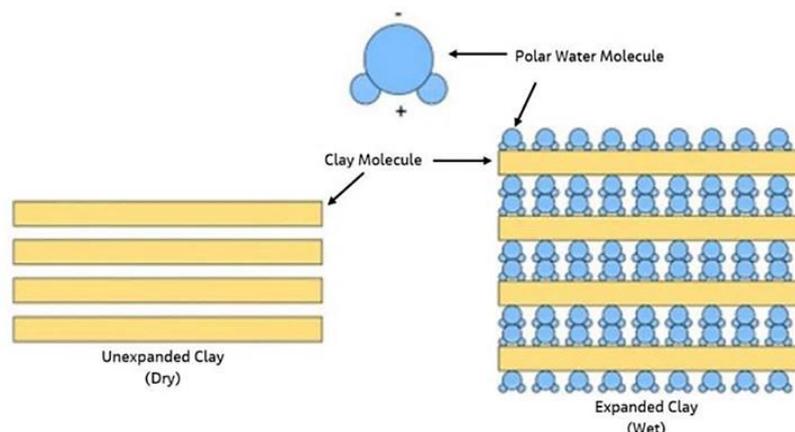
2.2.2.1. Mecanismo de los suelos expansivos

Un suelo se considera expansivo cuando se tiene un alto porcentaje de minerales arcillosos como la montmorillonita, illita expandible y la vermiculita, o si el límite líquido de un suelo supera el 50% y el índice de plasticidad supera el 30%. (Amakye & Abbey, 2021)

Como se observa en la figura siguiente las moléculas de agua en suelos expansivos son atraídas hacia los espacios entre las placas de arcilla, las cuales se asemejan a laminas estratificadas, lo que hace que el suelo absorba más agua obligando a las placas a separarse aún más.

Figura 1

Encogimiento e hinchamiento de suelos arcillosos expansivos



Nota: Extraído de Amakye & Abbey (2021).

Se muestra la expansividad (hinchamiento) de los suelos arcillosos correlacionado directamente con el límite líquido, así como el vínculo entre el potencial de hinchamiento y la expansividad de dicho suelo, estas tablas permiten una caracterización más detallada del comportamiento de suelos con expansividad frente a variaciones hídricas.

Tabla 2

Asociación entre el hinchamiento y el L.L.

Límite Líquido	Expansividad
0 – 20.0	No se expande
20.0 – 35.0	Baja expansión
35.0 – 50.0	Expansión media
50.0 – 70.0	Expansión alta
70.0 – 90.0	Expansión muy alta
> 90.0	Expansión extra alta

Nota: Información según Dakshanamurthy y Raman (1973).

Tabla 3

Expansividad del suelo en función del potencial de hinchamiento

Potencial de hinchamiento (%)	Expansividad del suelo
< 1	Insignificante
1 – 5	Bajo
5 – 15	Moderado
15 – 25	Alto
> 25	Muy alto

Nota: Información según Sridharan y Prakash (2000).



2.2.3. Ceniza residual derivado de hornos de ladrilleras

Así mismo, “en el Perú existen aproximadamente 2000 hornos para la fabricación de ladrillos artesanales. Los cuales generan 53500 toneladas/año de ceniza” Swisscontac (2012).

Los residuos que se producen durante la colocación de los ladrillos en los hornos, durante el traslado o altos porcentajes de humedad en la mezcla, se convierten en cenizas, siendo la ceniza de fondo la que presenta mayor densidad, por lo que es necesario su clasificación previa para utilizarlas como estabilizantes de suelos arcillosos (PRODUCE, 2010).

2.2.3.1. Ceniza Volante

Las cenizas volantes son un residuo finamente graduado resultante de la combustión de carbón pulverizado en una caldera y transportado por los gases de combustión, especialmente durante la generación de electricidad en las centrales térmicas, las partículas poseen la forma de esferas de óxidos de silicio, aluminio y hierro; el tamaño de la partícula varía de 0.01 micras a 100 micras. (Chang et al., 2016).

Para nuestro caso de estudio, las cenizas volantes vendrían a ser los residuos finos que se generan durante la combustión en los hornos de ladrilleras, estas partículas son arrastradas junto a los gases de escape y se acumulan mediante sistemas de filtración.

2.2.3.2. Ceniza de fondo

Comprende la fracción gruesa de ceniza producida en los hornos ladrilleros, a menudo se mezcla con impurezas minerales contenidas en el

combustible, el material cae al fondo del horno y se separa mecánicamente, la ceniza de fondo constituye la mayor parte (60%) del total de las cenizas producidas por la combustión de madera y carbón. (Aguilar & Bravo, 2020)

La composición química del análisis de la muestra de ceniza concierne a la suma de los componentes que tienen propiedades puzolánicas ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}_3$), las cuales son equivalentes al 25.71% en masa de las cenizas y que un 74.29% concierne al carbón inquemado. (Cubas & Falen, 2016).

Figura 2

Acumulación de ceniza de fondo en hornos de ladrilleras en Salcedo



Nota. Se muestra la acumulación de los residuos de ceniza ubicado en la parte inferior de los hornos de ladrilleras.

2.2.3.3. Temperatura del horno durante la cocción de ladrillos

Las propiedades de las cenizas dependen de las temperaturas a las que fueron obtenidas durante la cocción de los ladrillos, existen algunos

estudios sobre la medición de las temperaturas que oscilan dentro de los hornos artesanales, para ello se implementan sistemas para poder registrar las temperaturas; por ejemplo, según el estudio de Guerrero et al. (2017) indica que:

Durante la quema de los ladrillos en el horno se programó el software para que registrara las temperaturas cada 5 minutos en los tres niveles en el proceso de cocción para un total de 737 registros con los cuales se realizaron las gráficas de los perfiles de temperatura.

En el grafico siguiente se puede observar la distribución de los puntos de medición de temperaturas que ocurren en el horno a medida que se realiza la cocción de los ladrillos.

Figura 3

Ubicación de los termopares instalados por niveles en el horno

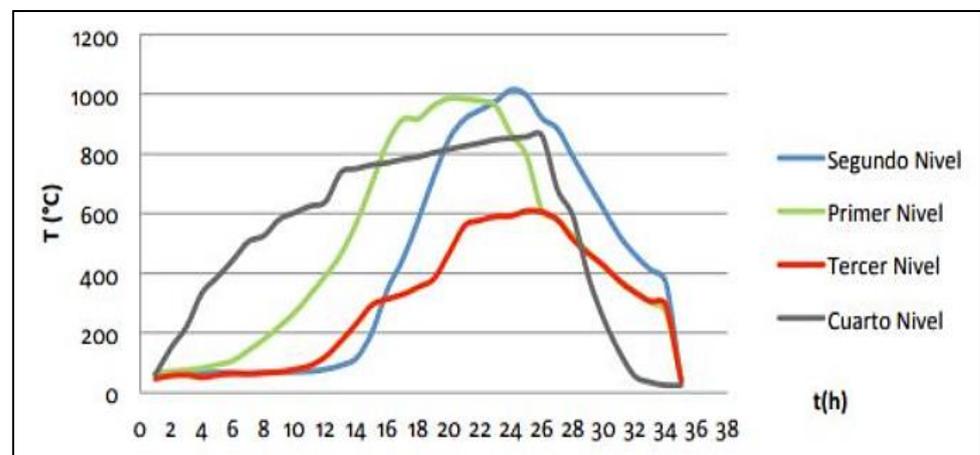


Nota: Extraído de Guerrero et al. (2017).

Guerrero et al. (2017) afirma que “En el nivel 1 se alcanza una temperatura máxima de 985,43 °C, en el nivel 2 de 1034,53 °C y de 627,35 °C para el nivel 3”, en base a esta información se puede deducir que durante la cocción de ladrillos las temperaturas del horno están en el rango de 300°C a 1000°C como se evidencia en el grafico siguiente.

Figura 4

Curvas de temperatura en cada nivel del horno



Nota: Extraído de Guerrero et al. (2017).

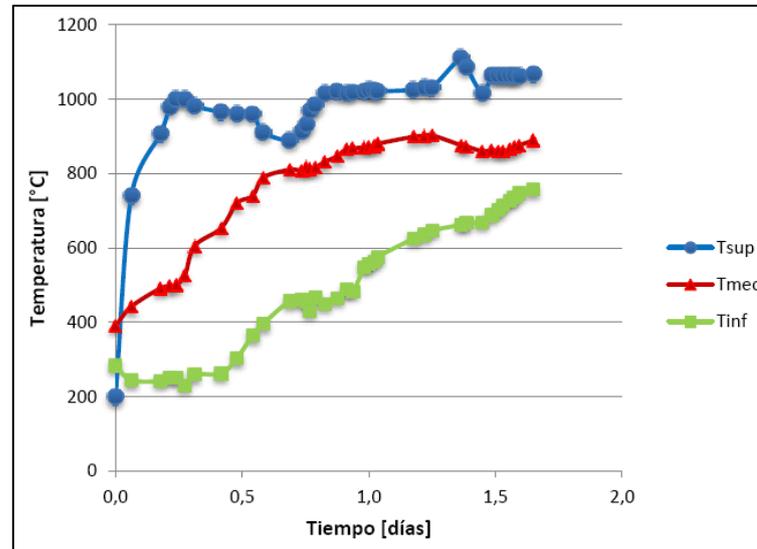
La temperatura en la parte superior del horno sube rápidamente hasta alcanzar los 1.000°C en unas 6 h del inicio de la quema; en la parte media se llega a una temperatura máxima de unos 900°C a las 30 h aproximadamente y, en la parte inferior, la temperatura sube lentamente hasta alcanzar unos 760 °C, en la parte inferior, la temperatura ya no aumenta más debido a que se producen filtraciones de aire frío desde el exterior hacia el interior del horno y esto hace imposible llegar a temperaturas por encima de los 800°C. (Luján & Guzmán, 2015)

En la figura a continuación se evidencia la evolución de temperaturas en el interior del horno de durante el proceso de fabricación

de ladrillos, donde se observa un rango de variación que va desde los 200°C a 1000°C.

Figura 5

Evolución de la temperatura en el horno (superior, media e inferior)



Nota: Extraído de Luján & Guzmán (2015).

2.2.4. Cal

Huancoillo (2017) indica que el uso vial más importante de la cal es el de estabilizar suelos, para estos fines se emplea la cal hidratada en polvo, que viene envasada en bolsas de papel facilitan de esta manera su manipuleo y transporte.

2.2.4.1. Tipos de cal empleadas

Para la estabilización de suelos, se emplean diferentes clases de cal, cada uno con características particulares que se adaptan según la naturaleza y/o requerimientos de la obra.

Según Nadal (2006) señala 2 tipos principales de cal:



a) Cal viva:

En términos teóricos se define como el óxido de calcio derivado por la calcinación del carbonato cálcico (CO_3Ca) a temperaturas que oscilan en 900 °C.



Se llama cal viva al producto industrial que se obtiene tratando, a la temperatura indicada, ciertas calizas que contienen, además de los dos compuestos aludidos, otras impurezas, especialmente de óxidos metálicos y sílice, los residuos del combustible en muchas ocasiones quedan incorporados al aglomerante, con lo que la composición de esta es muy variable. (Nadal, 2006)

b) Cal hidratada (cal apagada):

Cuando se da el contacto por parte del CaO con H_2O , se da una reacción derivando una fuerte calor, obteniéndose hidróxido de calcio o cal apagada.



Se indica que, “para el caso de cales apagadas, estas no dan reacción endotérmica en contacto con el agua y se comercializan en forma de polvo fino y seco o en lechada de cal”. (Huancoillo, 2017)

2.2.4.2. Acción de la cal en suelos arcillosos

El cemento es adecuado para suelos granulares y de baja plasticidad, mientras que para la cal es ideal en suelos de alta plasticidad,

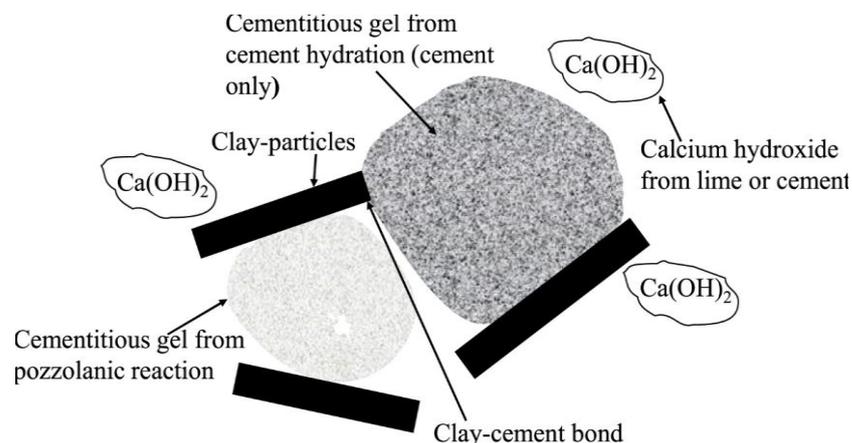
la arcilla tratada con cemento generalmente no produce un orden similar de resistencia o trabajabilidad que la cal. (Barman y Kumar, 2022)

Al mezclar el suelo con la cal, se produce una reacción rápida de floculación e intercambio iónico, seguida de otra muy lenta de tipo puzolánica, con formación de nuevos productos químicos, la sílice y alúmina de las partículas del suelo se combinan con la cal en presencia de agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles. (MTC, 2014)

Cuando se añade cal a suelos arcillosos en presencia de agua, se producen una serie de reacciones que conducen a la mejora de las propiedades del suelo, estas reacciones incluyen el intercambio de cationes, la floculación, la carbonatación y la reacción puzolánica. (Abdi et al., 2013)

Figura 6

Proceso de reacción puzolánica entre la cal y los minerales arcillosos.



Nota: Obtenido de Barman & Kumar (2022).

El intercambio de cationes tiene lugar entre los cationes asociados con las superficies de las partículas de arcilla y los cationes de calcio de la cal. El efecto del intercambio de cationes y la atracción hace que las



partículas de arcilla se acerquen entre sí, formando flóculos; este proceso se denomina floculación. La floculación es la principal responsable de la modificación de las propiedades de ingeniería de los suelos arcillosos cuando se tratan con cal. (Abdi et al., 2013)

2.2.5. Estabilización de suelos

La estabilización implica mejorar de las cualidades o características físicas de un determinado suelo a través de técnicas mecánicas o con la adición de materiales químicos, entre otros.

Tales estabilizaciones, por lo general, se realizaron en los suelos de subrasante inadecuado o insuficiente, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos (MTC, 2014).

Un suelo está estabilizado cuando se le considere con resistencia suficiente para recibir y transmitir adecuadamente las cargas a que deba estar sometido, y permanezca sin alteración importante durante todo el periodo de servicio de la obra. (Nadal, 2006)

Los conglomerantes de uso común en construcción, poseen en cierta forma aptitudes como estabilizantes en la mayoría de los suelos. El tipo de suelo, el clima de la región y las características de la obra definen el estabilizante más adecuado y descarta otros poco idóneos al caso, pero esta línea de separación no es, en general, muy clara, y más bien constituye una zona dentro del cual es el precio y los medios disponibles de puesta en obra los que deciden. (Nadal, 2006).

La presencia de materiales orgánicos retarda el proceso de reacciones puzolánicas. Su afinidad para retener la humedad reduce el agua disponible para

la hidratación. Además, las materias orgánicas tienden a formar una película que recubre los granos de los aditivos, lo que impide aún más la hidratación. Por lo tanto, la resistencia del suelo tratado tiende a reducirse. (Barman & Kumar, 2022).

Figura 7

Estabilización de suelos



Nota. Se muestra el proceso de estabilización de suelos en un proyecto de construcción vial para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Imagen propia.

2.2.5.1. Estabilización mecánica

Con la estabilización mecánica de suelos se pretende lograr cambios positivos a las propiedades del suelo existente, esto sin cambiar tanto la estructura y composición del mismo; como herramienta para lograr este tipo de estabilización se utiliza compactación, con la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo. (MTC, 2014).

2.2.5.2. Estabilización por combinación

Este tipo o método de estabilización se emplea cuando al suelo existente en la plataforma se le mezcla con otro suelo de aporte. Al suelo



existente se disgregará o escarificará, en una profundidad de 15cm y luego se colocará el material de préstamo o de aporte. (MTC, 2014)

Los materiales disgregados y los de aporte se humedecerán o airearán hasta alcanzar la humedad apropiada de compactación y previa eliminación de partículas mayores de 75 mm, si las hubiere; luego se procederá a un mezclado de ambos suelos, se conformará y compactará cumpliendo las exigencias de densidad y espesores hasta el nivel de subrasante fijado en el proyecto. (MTC, 2014)

2.2.5.3. Estabilización química

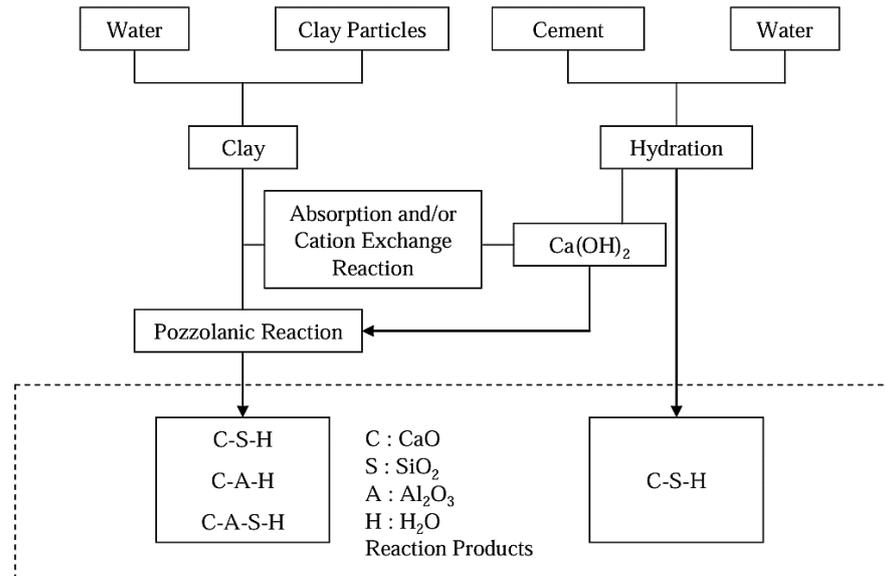
La estabilización química implica la aplicación de aditivos químicos para mejorar el comportamiento de los suelos, también se usa para reducir la plasticidad y el potencial de expansión-contracción, si las arcillas son dispersas, se utiliza para flocular las partículas; cuando las arcillas son difíciles de compactar, se pueden añadir productos químicos para dispersar ligeramente sus partículas y ayudar en el proceso. (Braja M, 2015)

Según Barman y Kumar (2022) señala que “en comparación con el efecto individual, el impacto combinado de los aditivos puede ser más eficiente para mejorar suelos débiles y hacerlos adecuados para construcciones de ingeniería”.

En la figura siguiente se puede observar un diagrama de flujo sobre la reacción química que se produce en un suelo arcilloso con la estabilización de la cal

Figura 8

Reacción química entre el suelo y cal



Nota: Obtenido de Jaritngam & Somchainue, (2014).

2.2.6. Método del pH (Eades y Grim)

La adición óptima de hidróxido de calcio necesaria para estabilizar o mejorar un suelo es aquella que garantiza el mantenimiento de un elevado valor de pH, el cual favorece el desarrollo de las reacciones puzolánicas; para ello se determina el pH con diferentes porcentajes de hidróxido de calcio, por lo tanto, el porcentaje óptimo es aquella cantidad que permite alcanzar un valor de mínimo de 12.40. (Eades & Grim, 1966).

Dicho método se indica en la norma ASTM D 6276, en la cual se detalla las siguientes consideraciones:



- Si el valor máximo obtenido en el pH es de 12.3, en al menos 2 incrementos sucesivos en el contenido de cal, en los especímenes probados, el menor contenido de cal que manifieste un pH de 12.3 se seleccionará como la cantidad óptimo de cal.
- Sí el valor registrado en el pH resulta inferior a 12.3, puede ser que la prueba esté invalidada debido a errores en el equipo o en la ejecución de las mediciones, o debido a escasez de cal en las mezclas. Se verifica tanto el electrodo en el peachímetro, al introducirlo en la solución calibrada a un pH de 12.0, como en la solución de agua con cal para detectar posibles errores en el equipo ó se repite la prueba utilizando porcentajes más altos de cal, ó se toman ambas medidas.

2.2.7. Caracterización conforme a la normativa AASHTO

Es muy empleado para aplicaciones ingenieriles, las siglas AASHTO significa American Association of State Highway Officials que traducido al español vendría a ser Asociación Estadounidense de Funcionarios de Carreteras Estatales.

De acuerdo con este sistema el suelo se clasifica en siete grupos principales: A-1 a A-7, los suelos que clasifican en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz #200; los suelos donde más de 35% pasa a través del tamiz #200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, estos son principalmente limo y materiales del tipo arcilla. (Braja M., 2015)

Tabla 4

Categorización de suelos basado en el I.G.

Índice de Grupo	Suelo de Subrasante
IG > 9	Inadecuado
Si el IG esta entre 4 a 9	Insuficiente
Si el IG esta entre 2 a 4	Regular
Si el IG esta entre 1 – 2	Bueno
Si el IG esta entre 0 - 1	Muy bueno

Nota: Extraído de (MTC, 2014).

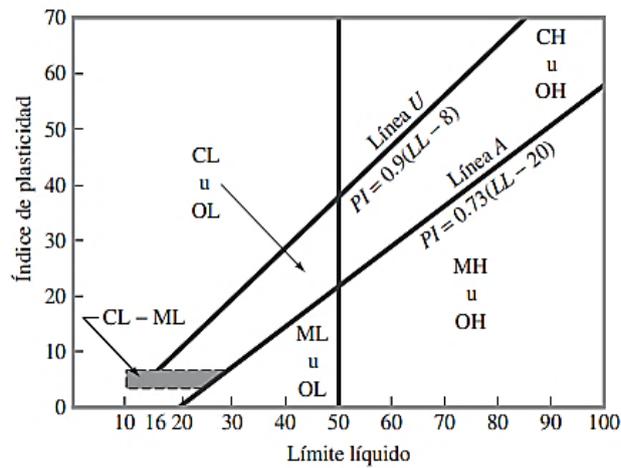
2.2.8. Caracterización según S.U.C.S.

Este sistema fue propuesto por Casagrande en 1948 para su uso en los trabajos de construcción del aeródromo realizado por el Cuerpo de ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial, luego en colaboración con el U.S. Bureau of Reclamation este sistema fue revisado en 1952. (Braja M., 2015)

Los suelos se designan por símbolos de grupo, el símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo; los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelo (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos. (Crespo, 2004).

Figura 9

Carta de plasticidad



Nota. Gráfico extraído del libro Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M., 2015).

2.2.9. Porcentaje de humedad

El comportamiento y la resistencia de los suelos dependen de la cantidad de agua que posean en el interior ya que esta propiedad influye directamente al cambio de volumen y a la estabilidad mecánica, el contenido de humedad se lo representa en porcentaje que va desde 0% cuando el suelo está seco a un valor máximo aproximado al 100%. (Mamani & Yataco, 2017).

2.2.10. Granulometría de suelos

Se realiza una determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de las partículas en suelos, la distribución de tamaños de las partículas a $75 \mu\text{m}$ (retenidas en la malla 200) es determinado por tamizado, mientras que la distribución de tamaños de partículas menores a $75 \mu\text{m}$ es determinado por un proceso de sedimentación usando un hidrómetro para obtener datos necesarios según sea el caso. (ASTM D 422, 2016)

2.2.11. Límites de Atterberg

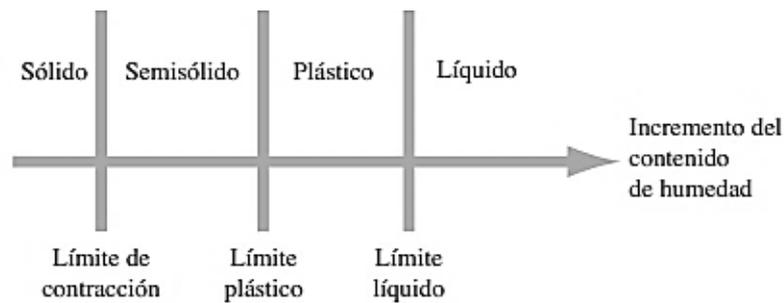
El científico sueco Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad, con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. (Braja M., 2015)

Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido; por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido. (Braja M., 2015)

En la siguiente figura es muestra un esquema de los estados básicos del suelo según el contenido de humedad:

Figura 10

Límites de Atterberg.



Nota. Obtenido de (Braja M., 2015).

El L.L. se define como el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico, de acuerdo con esta definición, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, pero definida

y según Atterberg es de 25 g/cm², la cohesión de un suelo en el límite líquido es prácticamente nula. (Crespo, 2004).

El L.P. se define como el contenido de humedad en porcentaje, en el que el suelo al enrollarse en hilos de 3.2 mm de diámetro se desmorona, el límite plástico es el límite inferior del escenario plástico del suelo, la prueba es simple y se realiza mediante rodados repetidos por parte de una masa de tierra de tamaño elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado. (Braja M., 2015).

El I.P. se denomina como la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico, e indica el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos, el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla; sin embargo, el índice de plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. (Crespo, 2004).

A continuación, se muestra la clasificación de los suelos según el Índice de Plasticidad proporcionado por el manual de carreteras, sección suelos y pavimentos:

Tabla 5

Clasificación de suelos conforme al I.P.

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20	Media	Suelos arcillosos
IP > 7		
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos
IP = 0	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Nota: Extraído de MTC (2014).

2.2.12. Ensayo de compactación de proctor modificado

Como lo indica Crespo (2004) la prueba de proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.

Tabla 6

Elección del método según norma ASTM D 1557

Método	% acumulado retenido N°4	% acumulado retenido 3/8"	% acumulado retenido 3/4"	Material a usar
A	$\leq 20\%$	-	-	Pasa N° 4
B	$> 20\%$	$\leq 20\%$	-	Pasa 3/8"
C	-	$> 20\%$	$\leq 30\%$	Pasa 3/4"

Nota: Extraído de ASTM D 1557

Tabla 7

Características de cada método según norma ASTM D 1557

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diam. del molde (mm)	101.60	101.60	101.60
Volumen del molde (cm ³)	943.30	943.30	943.30
Concepto	Método A	Método B	Método C
Peso del pistón (N)	44.50	44.50	44.50
Altura de caída del pistón (mm)	457.20	457.20	457.20
N° de golpes por capa	25	25	56
N° de capas de compactación	5	5	5

Nota: Extraído de ASTM D 1557

2.2.12.1. O.C.H.

Contenido de humedad en el que el agua dentro del suelo actúa como lubricante y material que activa la unión de partículas en el suelo, el suelo compactado atrapa la menor cantidad de vacíos en forma de aire, haciendo así que el momento de estar seco tenga la mayor cantidad de masa posible. (Chirinos, 2016).

2.2.12.2. M.D.S.

Según Chirinos (2016) se define como el punto en el cual la porosidad del suelo disminuye al mínimo, representado así la máxima compacidad alcanzable por el material en cuestión.

2.2.13. Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)

El valor relativo de soporte de un suelo (C.B.R.) es un índice de su resistencia al esfuerzo cortante en condiciones determinadas de compactación y humedad, y se expresa como el tanto por ciento de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo, respecto a la precisa para que el mismo pistón penetre a la misma profundidad de una muestra tipo de piedra triturada (Crespo, 2004).

Tabla 8

Propiedades de la muestra patrón

Penetración registrada		Presión ejercida		
mm	pulgadas	MN/m ²	kg/cm ²	lb/plg ²
2.540	0.100	6.900	70.310	1.000
5.080	0.200	10.350	105.460	1.500

Nota. Obtenido del Manual de ensayo de materiales (MTC, 2016).



Con el fin de saber si la prueba estuvo bien ejecutada se dibuja la curva carga-penetración, anotando en las abscisas las penetraciones y en las ordenadas las cargas registradas para cada una de dichas penetraciones, si esta curva es defectuosa se debe probablemente a que la carga inicial de la prueba fue mayor a los 10 kg especificados, se debe repetir la prueba. (Crespo, 2004)



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. GENERALIDADES

3.1.1. Método del estudio

Para el presente estudio, el método empleado fue el científico pues se llevó a cabo siguiendo la estructura que se detalla a continuación: observación, formulación del problema, generación de hipótesis, experimentación y por último conclusiones, con el propósito de producir información confiable y que pueda ser replicado.

3.1.2. Nivel del estudio

El nivel corresponde al descriptivo, y como tal se enfoca en conocer el comportamiento de la incorporación de ceniza de fondo y cal en arcillas a nivel de subrasante. Los datos a obtener serán de naturaleza cuantitativa, pues la recolección de datos será en base a mediciones numéricas, con el fin de probar la hipótesis planteada inicialmente.

3.1.3. Diseño del estudio

Para el presente estudio corresponde un diseño experimental, pues se va manipular los porcentajes de los insumos a incorporar para observar el efecto sobre el suelo arcilloso para subrasante.



3.2. MÉTODOS DE COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN

3.2.1. Técnicas

- a) **Inspección directa:** Para obtener la información requerida se observó de forma directa y experimental el comportamiento que presenta el suelo arcilloso de subrasante adicionando porcentajes establecidos de ceniza de fondo y cal.
- b) **Documentación:** Se tiene en consideración la información recopilada, trabajos de investigación, libros referidos al área de estudio y normativas para los trabajos de campo y de laboratorio.

3.2.2. Instrumentos

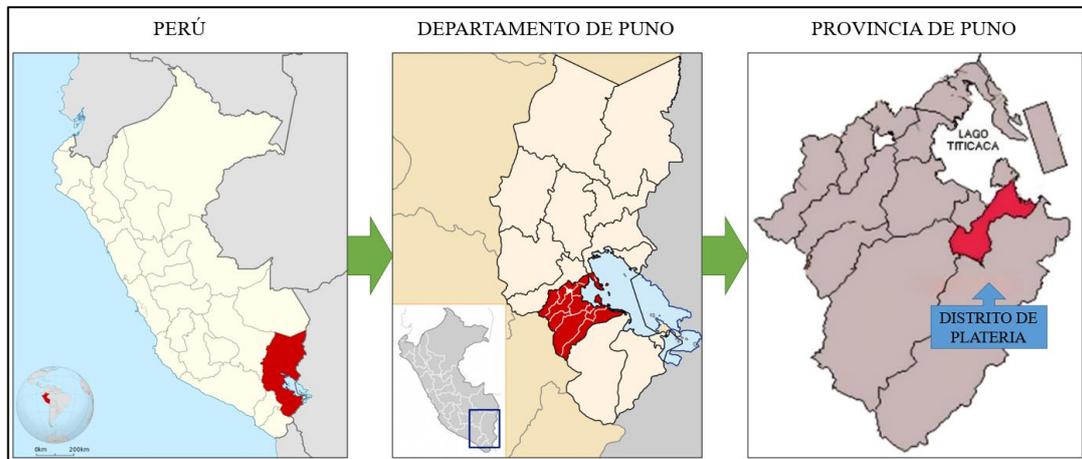
- a) **Recolección de información en campo:** Se emplea registros, flexómetro, equipo fotográfico, pico, pala, sacos, pizarra, cinta de embalaje y vehículo para el traslado de las muestras respectivas.
- b) **Recolección de datos en laboratorio:** Se emplea diversos instrumentos de laboratorio como balanzas de laboratorio, mallas para el análisis granulométrico, equipo de casa grande, vidrio esmerilado, equipos para el proctor modificado, CBR y la respectiva prensa de carga.

3.3. UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

El presente estudio para el mejoramiento de subrasante arcillosa se llevó a cabo en la red vial vecinal que conecta los centros poblados de Pallalla y Totojira (Platería, Puno, Puno), en Perú. A continuación, se muestra la figura donde se detalla la ubicación política del camino vecinal.

Figura 11

Localización política de la zona estudiada

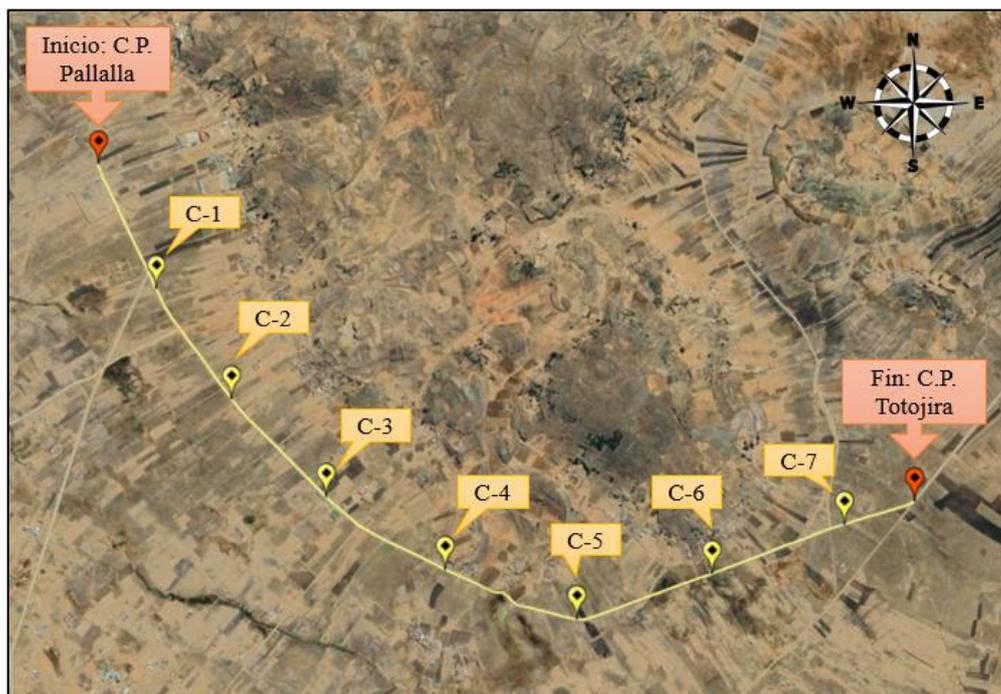


Nota. Elaboración propia.

Seguidamente se muestra la localización del camino vecinal en estudio y los puntos de exploración para el presente trabajo de investigación, el inicio se toma como referencia en el centro poblado de Pallalla y el final en el centro poblado de Totojira.

Figura 12

Ubicación del camino vecinal y puntos de exploración



Nota: Elaboración propia. Programa empleado: Google Earth.



Tabla 9

Datos básicos del camino vecinal en estudio.

Descripción	Longitud	Ancho promedio de plataforma	Inicio (UTM WGS 84 Zona 19L)	Final (UTM WGS 84 Zona 19L)
Carretera Pallalla - Totojira	3.8 km	4.00 m	416333.56 E 8238220.74 S	419135.06 E 8236928.18 S

Nota. Elaboración propia.

Tabla 10

Georreferenciación de los puntos de exploración

Descripción	Progresiva	Ubicación (UTM WGS 84 Zona 19L)
C-1	KM 00+500	416519.00 m E 8237809.00 m S
C-2	KM 01+000	416776.00 m E 8237399.00 m S
C-3	KM 01+500	417098.00 m E 8237039.00 m S
C-4	KM 02+000	417502.00 m E 8236767.00 m S
C-5	KM 02+500	417949.00 m E 8236577.00 m S
C-6	KM 03+000	418424.00 m E 8236713.00 m S
C-7	KM 03+500	418895.00 m E 8236865.00 m S

Nota. Elaboración propia.



3.4. POBLACIÓN Y SELECCIÓN MUESTRAL

3.4.1. Población del estudio

Está conformada por el suelo de subrasante del camino vecinal que inicia del centro poblado de Pallalla hacia Totojira.

3.4.2. Muestra del estudio

“En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra”. (Hernández et al., 2014)

Se realizó un total de 7 calicatas a lo largo del camino vecinal Pallalla – Totojira, a cada 500 metros, a una profundidad de excavación de 1.50 m y en forma alternada (lado izquierdo y lado derecho), de esta forma se confirmó la presencia de arcillas a nivel subrasante en los puntos de exploración C-01, C-02, C-03, C-04 y C-07, en base al criterio del investigador se seleccionó el suelo arcilloso con las condiciones más críticas para su estudio en el presente estudio.

Se llevó a cabo el estudio con los suelos arcillosos de las calicatas C-02 y C-03, los cuales fueron clasificados como CL y CH respectivamente, la cantidad de ensayos ejecutados en laboratorio con y sin la adición de los aditivos estabilizantes, ceniza de fondo y cal, se detallan a continuación.

Tabla 11

Especificación del tamaño muestral

Calicata	Prueba	Número de ensayos por dosificación analizada					
		S.N.	S97-CF0-C3	S94-CF3-C3	S91-CF6-C3	S88-CF9-C3	S85-CF12-C3
C-01	Contenido de	12	-	-	-	-	-
C-02	humedad						
C-03	Granulometría	12	-	-	-	-	-
C-04	Límite Líquido	12	-	-	-	-	-
C-05							
C-06	Límite Plástico	12	-	-	-	-	-
C-07							
	Límite Líquido	-	2	2	2	2	2
C-02	Límite Plástico	-	2	2	2	2	2
	Proctor modificado	2	2	2	2	2	2
	CBR	2	2	2	2	2	2
	Límite Líquido	-	2	2	2	2	2
C-03	Límite Plástico	-	2	2	2	2	2
	Proctor modificado	2	2	2	2	2	2
	CBR	2	2	2	2	2	2

Nota. Elaboración propia.

Las denotaciones utilizadas en la tabla anterior significan:

- S.N.: Suelo natural
- S97-CF0-C3: Suelo Natural + 3% de cal
- S94-CF3-C3: Suelo Natural + 3% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S91-CF6-C3: Suelo Natural + 6% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S88-CF9-C3: Suelo Natural + 9% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S85-CF12-C3: Suelo Natural + 12% de ceniza de fondo y 3% de cal



3.5. PROCEDIMIENTO

3.5.1. Obtención de la ceniza de fondo

a) Equipos y materiales

- **Pala:** Herramienta manual empleado para levantar las muestras de ceniza de fondo de los hornos de ladrillos.
- **Sacos:** Empleado para almacenar y transportar las muestras de ceniza de ladrillo del punto de muestreo hacia el laboratorio.
- **Zaranda:** Tiene el propósito de eliminar materiales contaminantes de la ceniza de fondo que se pretende muestrear.
- **Tamiz N° 40:** La abertura de sus mallas es de 0.425 milímetros, es parte de un sistema estandarizado de tamices utilizado para evaluar la distribución del tamaño de partículas de suelo.

b) Procedimiento

Se procedió a la recolección de la ceniza de fondo proveniente de los hornos de ladrilleras ubicados en los cantonares del dentro poblado de Salcedo, provincia de Puno, para esta actividad se utilizaron una pala y sacos.

Así mismo, se aplicó un proceso de purificación mediante el uso de una zaranda metálica., de esta manera se elimina ciertos contaminantes indeseables o materiales de gran tamaño que pueda tener la ceniza en estudio.

Figura 13

Recolección de ceniza de fondo de los hornos de ladrilleras



Nota: Imagen propia.

Ya en laboratorio se tamizó las muestras de ceniza de fondo con el tamiz N° 40 para su respectiva adición según las diferentes dosificaciones estudiadas en el presente trabajo de investigación, la elección de este tamiz se fundamenta en concordancia con la prueba de límites de Atterberg, el cual especifica que el material ensayado debe pasar el tamiz N° 40 para evaluar las propiedades de límite líquido y límite plástico. Este enfoque garantiza de cierto modo una coherencia metodológica en la caracterización del material recolectado.

3.5.2. Muestreo de material

a) Equipos y materiales

- **Pala:** Es una herramienta manual empleado para levantar las muestras de suelo y llenarlos a los sacos respectivos.
- **Sacos:** Se utiliza para almacenar y transportar las muestras de suelo del punto de muestreo hacia el laboratorio, se debe conseguir sacos espaciales para evitar la pérdida de finos del suelo.

- **Bolsas plásticas herméticas:** Son capaces de crear un sello hermético impidiendo el paso del aire o la humedad hacia el interior de la bolsa y viceversa.
- **Retroexcavadora:** Se empleó para realizar excavaciones necesarias en el terreno de manera eficiente, se requiere tener diligencia para garantizar que el operador de la retroexcavadora no contamine los distintos estratos identificados durante la ejecución de las calicatas, preservando de esta forma la representatividad de los estratos para sus respectivos estudios en laboratorio.

b) Procedimiento

Según la normativa MTC (2014), especifica que para la caracterización de la subrasante se deben realizar calicatas de 1.50 metros de profundidad y para carreteras de bajo flujo de vehículos la frecuencia debe ser de 1.0 calicata por cada kilómetro, adicionalmente se detalla que las calicatas se ubicaran longitudinalmente y en forma alternada a distancias aproximadamente iguales.

Figura 14

Excavación de calicatas con maquinaria



Nota: Imagen propia.



En este trabajo de investigación se optó por duplicar la frecuencia de calicatas con el fin de tener una mayor certeza en la caracterización del suelo de subrasante, por tanto, se realizó 1 calicata cada 500 m. Este criterio mejora la representatividad de los datos obtenidos.

3.5.3. Ensayo de porcentaje de humedad

Siguiendo el procedimiento estandarizado de la norma ASTM D 2216 como guía metodológica se tiene:

a) Equipos y materiales

- **Balanza de precisión:** Se requiere con una sensibilidad de 0.01 g. para muestras con una masa de hasta 200 g. y otra con una sensibilidad de 0.1 g. para muestras con una masa superior a 200 g., en ambos casos excluyendo la masa del recipiente.
- **Horno de secado:** Este equipo debe ser capaz de sostener una temperatura de 110 ± 5 °C.
- **Contenedores de especímenes:** Son recipientes adecuados de material resistente a cambios de temperatura altas producidas por el horno de secado.
- **Instrumentos de manipulación:** Espátulas, cucharones, guantes de seguridad, pinzas o un soporte para la manipulación adecuada de contenedores calientes.

b) Procedimiento

Es recomendable realizar el ensayo de contenido de humedad tan pronto como sea posible después del muestro, se debe evitar el contacto directo con la



luz solar pues la idea es reducir al mínimo la pérdida de humedad en el interior de los contendores.

Ya estando en laboratorio se determina el peso de las muestras húmedas, para evitar la lectura de datos incorrectos se recomienda etiquetar cada recipiente o tara usado, posteriormente se coloca las muestras en el horno de secado, luego de mínimo 16 horas de secado se procede a lecturar el peso seco de la muestra y con esta información se procesa en gabinete.

3.5.4. Ensayo de granulometria

Siguiendo el procedimiento estandarizado de la norma ASTM D 422 como guía metodológica se tiene:

a) Equipos y materiales

- **Balanza de precisión:** Balanza con una perceptibilidad de 0.01 g. y 0.1 g. para pesar material pasante y retenido en el tamiz N° 10 respectivamente.
- **Tamices:** Se emplea una serie de recipientes con mallas cuadradas en la parte inferior las cuales deben cumplir con la norma ASTM E 11.
- **Brochas y cepillos metálicos:** Son empleadas para limpiar el juego de tamices mientras se realiza el ensayo, las brochas para las mallas con aberturas pequeñas y el cepillo metálico para mallas con aberturas grandes.
- **Bandejas:** Son envases metálicos de forma cuadrada o rectangular.

b) Procedimiento

Para obtener la muestra representativa en laboratorio se cuartea el material que se obtuvo en campo luego se lava la muestra a ensayar, seguidamente se seca en el horno. Cuando esté seco el material lavado se tamiza, para nuestro caso el proceso de tamizado se hizo de forma manual agitando con movimientos

rotatorios de forma horizontal y vertical. A medida que se va tamizando por cada malla se va pesando en las balanzas de precisión, con estas masas obtenidas se procede a caracterizar el % de grava, % de arena y el % de suelos finos para su posterior clasificación del suelo en estudio.

Figura 15

Ensayo de análisis granulométrico



Nota: Imagen propia.

3.5.5. Método para estimar el porcentaje óptimo de cal según el pH.

Siguiendo el procedimiento estandarizado de la norma ASTM D 6276 como guía metodológica se tiene:

a) Equipos y materiales

- **Balanza de precisión:** Se emplea una balanza con sensibilidad de 0.01 g.
- **Tamiz N° 40:** El suelo a ensayar debe ser pasante del tamiz N° 40.
- **Recipientes de plástico:** Para el almacenaje de las mezclas suelo-cal y deben poder cerrar herméticamente.
- **Gotero de agua:** Empleado para adicionar agua destilada a la muestra ensayada en cantidades controladas.
- **Probetas graduadas:** Para la adición de agua se pueden usar probetas de 100 ml.

- **Medidor de pH:** Necesario para poder lecturar los valores para cada mezcla a analizar.
- **Termómetro:** Que sea capaz de lecturar temperaturas que oscilen los 25°C.

Figura 16

Registro del pH en suelo tratado con cal



Nota: Imagen propia.

b) Procedimiento

Primero se obtiene muestra de 350 gramos pasante del tamiz #40 del suelo en estudio, luego se seca en un horno a una temperatura menor a 60°C para obtener un material completamente seco. Se pesa cinco especímenes con un peso equivalente de 25 gramos cada uno y se almacena en recipientes de plástico debidamente identificado, se tiene la siguiente formula:

$$M_a = 25 \left(1 + \frac{W}{100} \right)$$

Donde:

Ma = masa del espécimen de suelo secado al horno

W = contenido de agua de la muestra seca

Posteriormente se agrega cantidades de 2, 3, 4, 5, y 6% de cal en relación al peso seco de cada muestra, para el sexto espécimen se coloca 2.0 gramos de cal

(solución saturada de cal), Luego se agrega 100 ml de agua a todas las pruebas, se procede a cerrar herméticamente (los recipientes se tapan firmemente) y se agitan por un periodo de 30 segundos cada 10 minutos durante 1 hora, de esta forma se garantiza una mezcla homogénea. La temperatura que debe tener los especímenes ensayados es $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Finalmente con el medidor de pH se procede a registrar las respectivas lecturas de cada espécimen, para la presente investigación se tienen los siguientes resultados.

Tabla 12

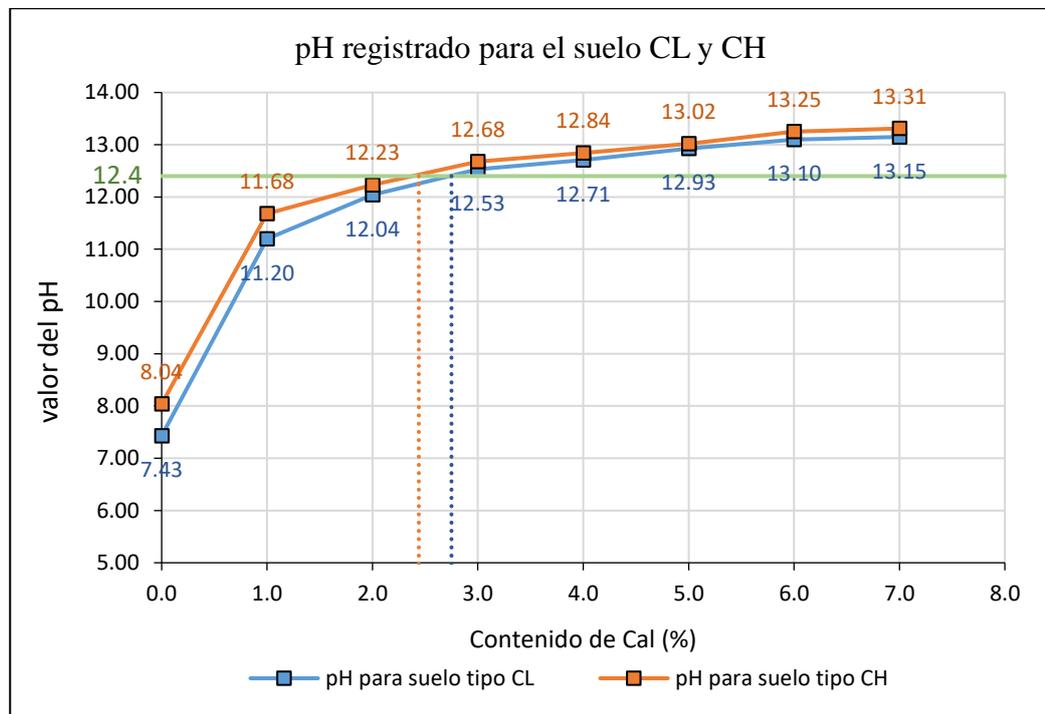
Registro de los valores de pH para suelo CL y CH

Tipo de suelo	N° de espécimen	% de Cal	Peso del suelo (g)	Peso de la cal (g)	Peso del agua (ml)	pH (unidades)
CL	1	0 %	25	0.00	100	7.43
	2	1 %	25	0.25	100	11.20
	3	2 %	25	0.50	100	12.04
	4	3 %	25	0.75	100	12.53
	5	4 %	25	1.00	100	12.71
	6	5 %	25	1.25	100	12.93
	7	6 %	25	1.50	100	13.10
	8	7 %	25	1.75	100	13.15
CH	1	0 %	25	0.00	100	8.04
	2	1 %	25	0.25	100	11.68
	3	2 %	25	0.50	100	12.23
	4	3 %	25	0.75	100	12.68
	5	4 %	25	1.00	100	12.84
	6	5 %	25	1.25	100	13.02
	7	6 %	25	1.50	100	13.25
	8	7 %	25	1.75	100	13.31
Condición Saturada		-	-	2.00	100	13.36
Agua		-	-	-	100	7.28

Nota: Elaboración propia.

Figura 17

Efecto del contenido de cal sobre el valor de pH del suelo tratado



Nota: Elaboración propia.

La grafica anterior muestra que los valores iniciales de pH registrados son 7.43 y 8.04 para los suelos CL y CH respectivamente. También se evidencia que al añadir un 3% de cal, el pH del suelo CL se incrementa a 12.53; mientras que para el suelo CH, con el mismo porcentaje de cal, el pH aumenta a 12.68; por lo que en ambos casos el pH obtenido está por encima de 12.4. En base a estos resultados se determina que con una adición de 3% de cal, en ambos tipos de suelos se producirán reacciones puzolánicas.

3.5.6. Ensayo de límites de Atterberg (L.L. y L.P.)

Siguiendo el procedimiento estandarizado de la norma ASTM D 4318 como guía metodológica se tiene:

a) Equipos y materiales



- ***Copa de Casagrande:*** Llamado cuchara de Casagrande, se refiere al instrumento de medición para hallar el límite líquido de un suelo, consiste de una media esfera metálica acoplado a un mecanismo con manivela al girar la manivela produce elevación del casquete y en un punto determinado cae dicho casquete generando así un impacto controlado contra una base dura.
- ***Balanza de precisión:*** Con una perceptibilidad de 0.01 g. para el pesado de las muestras.
- ***Horno de secado:*** Este equipo debe poder mantener una determinada temperatura.
- ***Placa de vidrio para suelo:*** También conocido como vidrio esmerilado, consiste en una placa cuadrada de cristal de por lo menos 30 cm de lado y 1 cm de espesor.
- ***Tamiz N° 40:*** El suelo a ensayar debe ser pasante del tamiz N° 40.
- ***Taras:*** Envases metálicos pequeños, las cuales deben ser resistentes a altas temperaturas.
- ***Gotero de agua:*** O en su defecto un recipiente similar, empleado para adicionar agua destilada a la muestra ensayada en cantidades controladas.
- ***Espátula:*** Usado para mezclar el agua con la muestra de suelo ensayada.

Figura 18

Instrumentos para realizar el ensayo de L.L. y L.P.



Nota: Imagen propia.

b) Procedimiento

Para hallar el límite líquido, se humedece la muestra representativa y para nuestro caso en suelos arcillosos debe estar como mínimo 16 horas humedecido, luego se adhiere la cuchara de Casagrande para realizar los golpes y su respectivo ranurado. Se debe lecturar como mínimo 3 contenidos de humedad.

Con respecto al límite plástico se debe seleccionar una porción de aproximadamente 20 gramos, es posible usar las muestras restantes del anterior ensayo, con el material seleccionado se forma una masa elipsoidal hasta formar una especie de hilos con una anchura de aproximadamente 1/8 de pulgada, estos hilos de suelo son válidos si se aprecia que se quiere romper en varios pedazos. Posteriormente se saca el contenido de humedad de las porciones que son válidas y estas deben pesar como mínimo 6 g. de suelo.

Figura 19

Muestras ensayas para determinar el L.L. y el L.P.



Nota: Imagen propia.

3.5.7. Ensayo de Proctor Modificado

Con el procedimiento estandarizado de la norma ASTM D 1557 como guía metodológica se tiene:

a) Equipos y materiales

- **Molde de 4 pulgadas:** Debería tener un volumen aproximado de 0.0333 ± 0.0005 pies³ (equivalente a 943.0 ± 14.0 cm³).
- **Apisonador:** Este debe caer libremente a una distancia estimada de 18.00 ± 0.05 pulg. La cara del apisonador debe tener un diámetro de 2.000 ± 0.005 pulg. (equivalente a 50.80 ± 0.13 mm).
- **Extractor de muestras:** Comprende un gato, adaptado especialmente para sacar muestras moldeadas ya sea de 4 o de 6 pulgadas.
- **Tamices:** Se empleará tamices 3/4", 3/8" y N° 4 según sea el método a optar.



- **Probetas graduadas:** Para la adición de agua se pueden usar probetas de 1000 ml o 100 ml.
- **Enrasador:** Es una regla metálica usado para nivelar el suelo un ves compactado dentro del molde.
- **Contenedores de especímenes:** Recipientes de metal que son resistentes a cambios de temperatura altas producidas por el horno de secado.
- **Bandejas:** Envases metálicos empleados para almacenamiento de muestras de suelos o también destinados a llevar a cabo la medición del peso de las muestras de suelo.
- **Bolsas herméticas:** Son capaces de crear un sello hermético impidiendo el paso del aire o la humedad hacia el interior de la bolsa y viceversa.
- **Herramientas variadas:** Guantes de seguridad, guantes de goma, espátulas, brochas, cucharones, etc.

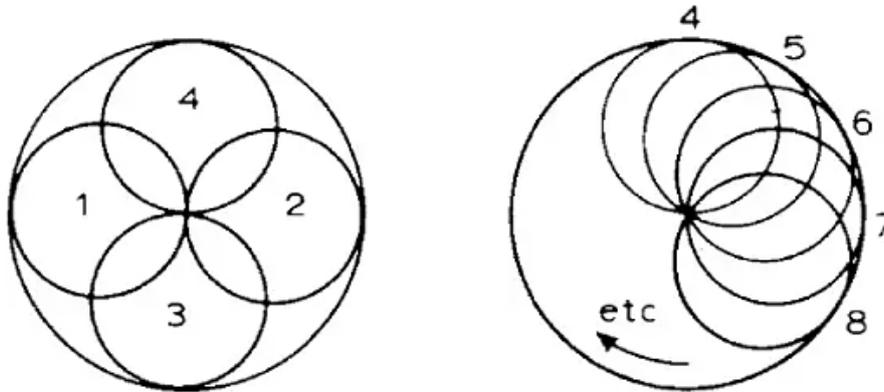
b) Procedimiento

Primero se determina el método A, B o C, para nuestro caso de estudio optamos por la aplicación del Método A debido a la clasificación de los suelos como finos.

Para cada molde se debe preparar un aproximado de 3 kg de muestra, se agrega agua de forma arbitraria y se mezcla uniformemente (cada punto de ensayo requiere un aumento constante en el contenido de humedad). Para suelos arcillosos se deja saturar un periodo mínimo de 16 horas. Posteriormente como el método lo especifica se dan 25 golpes para cada una de las 5 capas en el molde ensayado, estos golpes se aplican en toda el área girando el pistón adecuadamente como se especifica en la siguiente figura:

Figura 20

Patrón para la compactación en moldes de 4 pulg.



Nota. Extraído de la norma ASTM D 1557.

Una vez compactado la muestra de suelo se procede a enrasar cuidadosamente al nivel del molde, siempre evitando dañar la parte compactada. Finalmente se pesa en la balanza de precisión el peso de la probeta obtenida, se repite estos pasos para cada moldeo respectivamente.

Dada la índole de la presente investigación se fabricaron un total de 96 probetas, para los suelos CL y CH en las siguientes dosificaciones:

Suelo CL:

- S.N.: Suelo natural
- S97-CF0-C3: Suelo Natural + 3% de cal
- S94-CF3-C3: Suelo Natural + 3% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S91-CF6-C3: Suelo Natural + 6% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S88-CF9-C3: Suelo Natural + 9% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S85-CF12-C3: Suelo Natural + 12% de ceniza de fondo y 3% de cal

Suelo CH:

- S.N.: Suelo natural
- S97-CF0-C3: Suelo Natural + 3% de cal
- S94-CF3-C3: Suelo Natural + 3% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S91-CF6-C3: Suelo Natural + 6% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S88-CF9-C3: Suelo Natural + 9% de ceniza de fondo y 3% de cal
- S85-CF12-C3: Suelo Natural + 12% de ceniza de fondo y 3% de cal

Figura 21

Proceso de compactación del ensayo



Nota: Imagen propia.

3.5.8. Ensayo de CBR de laboratorio

Para esta prueba se cuenta con el procedimiento estandarizado en la norma ASTM D 1883 como guía metodológica:

a) Equipos y materiales

- **Moldes de metal:** Especificado en dicha normativa.



- **Disco espaciador:** Con un diámetro en la cara externa de 5 15/16” pulg. (aproximadamente 150.8 mm) y una altura de 2.416 ± 0.005 pulg. (equivalente a 61.37 ± 0.13 mm).
- **Pisón de compactación:** Se emplea el mismo apisonador de la anterior prueba.
- **Pesas:** Se emplea 2 pesas metálicas.
- **Horno:** Se emplea el mismo horno de secado que se usó para el ensayo de Proctor Modificado ASTM D 1557.
- **Papel filtro:** es un papel de filtrado rápido, endureciendo la alta calidad cuenta con un diámetro de 6 pulg. aproximadamente.
- **Bandejas:** Envases metálicos empleados para almacenamiento de muestras de suelos o también destinados a llevar a cabo la medición del peso de las muestras de suelo.
- **Prensa CBR:** Especificado en la normativa tratada.
- **Tanque de agua:** También llamado tanque de remojo, debe ser lo suficientemente grande para que al sumergir moldes de CBR se encuentre debajo del agua.
- **Aparato medidor de expansión:** Consiste en un vástago (comúnmente de un material metálico) ajustable y una placa perforada, también es necesario un trípode de metal para soportar el dial indicador.
- **Misceláneos:** Guantes de seguridad, guantes de goma, espátulas, brochas, cucharones, etc.

Figura 22

Instrumentos para realizar las pruebas de CBR en laboratorio



Nota: Imagen propia.

b) Procedimiento

Primero se procede a agregar agua según la cantidad requerida a las muestras a ensayar, para el caso de suelos arcillosos se deja saturar un mínimo de 16 horas antes de compactar. Para este ensayo se elaboran tres moldes, ajustando el número de golpes para cada uno. Luego se quita el collar de extensión para su enrase, después se desmonta el molde y se vuelve a poner de forma invertida y de ahí se procede a registrar el peso.

Figura 23

Proceso de compactación para el ensayo de CBR en laboratorio



Nota: Imagen propia.

A continuación, se registra la expansión inicial, luego se sumerge en agua, todos los moldes elaborados y estarán en el agua por un espacio de tiempo de 96 horas (4 días), para la presente investigación se llevó un seguimiento estricto del comportamiento de la expansión para todos los moldes de CBR fabricados en laboratorio para determinar el desempeño de esta propiedad adicionando ceniza de ladrillo y cal. De esta forma se hizo registro a cada 24 horas de la expansión.

Después de un cierto periodo de inmersión, se retiran los moldes del tanque de agua, se aconseja verter el agua que quedo retenida dentro del molde, dejando escurrir por un lapso de 15 min. aproximadamente en su posición normal, se procede a retirar las sobrecargas. Inmediatamente se pesa y se emplea la prensa.

Figura 24

Inmersión de los moldes de CBR en agua



Nota: Elaboración propia.

En la prensa CBR se coloca de forma cuidadosa el molde a ensayar, el orificio central de dicho molde debe coincidir con el pistón de penetración, es posible acomodar debido del molde los discos espaciadores para ganar altura y



tener un mayor acercamiento. Se elevará el molde hasta que el sensor de fuerza indique contacto, y se procede a tarar los diales digitales, se anota cuidadosamente las lecturas respectivas de carga y registro de los datos de los diales.

3.6. VARIABLES DEL ESTUDIO

Se establecen con precisión tres variables clave, designados como dos dependientes y una dependiente, este enfoque metódico sirve para analizar las relaciones y efectos que serán objeto de investigación en este estudio.

Variable Independiente (V.I.) → Variable Dependiente (V.D.).

3.6.1. Ceniza de fondo (V.I.)

Son los residuos sólidos que se generan durante la etapa de producción de ladrillos en las ladrilleras y se acumula en el fondo de los hornos. Se adiciona al suelo arcilloso del camino vecinal Pallalla - Totojira, considerando porcentajes de 3%, 6%, 9% y 12%. La dimensión que corresponde a esta variable es la cantidad y el indicador vendría a ser el porcentaje de ceniza de fondo empleado según la dosificación requerida.

3.6.2. Cal (V.I.)

Es un compuesto químico que se obtiene mediante la calcinación de piedra caliza, es empleado como material de construcción y estabilización de suelos. Se adiciona al suelo arcilloso del camino vecinal Pallalla - Totojira, considerando 3% para las 5 dosificaciones. La dimensión de esta variable es la cantidad y el indicador vendría a ser el porcentaje de cal empleado según la dosificación requerida.



3.6.3. Estabilización de suelos (V.D.)

Conjunto de técnicas y procesos empleados para mejorar las cualidades de suelos arcillosos. Se evalúa los datos obtenidos en base a los ensayos realizados según normativa. Se tiene 2 dimensiones para esta variable: propiedades físicas y propiedades mecánicas.

3.7. VALORACIÓN ESTADÍSTICA

En este estudio la V.I. se clasifica como una variable ordinal, porque se puede jerarquizar los niveles de dosificación, donde la escala de porcentaje de aditivos estudiados progresa de menor a mayor. Por otro lado, la variable dependiente es de tipo continua, pues se caracteriza por medir valores numéricos de los ensayos realizados.

3.7.1. Verificación de normalidad

Paso 1: *Hipótesis de normalidad*

H_0 : Los resultados de los ensayos realizados siguen una distribución normal.

H_1 : Los resultados de los ensayos realizados no siguen una distribución normal.

Paso 2: *Nivel de significancia*

Nivel de confianza: 0.950

Margen de error: 0.050

Paso 3: *Test de normalidad*

Si se tiene que $n > 50$ usamos el método Kolmogorov – Smirnov

Si se tiene que $n < 50$ usamos el método Shapiro – Wilk



Paso 4: Principio de juicio

Para p-valor < 0.050 rechazamos la H_0 planteada inicialmente

Para p-valor ≥ 0.050 aceptamos la H_0 y por consiguiente rechazamos la H_1

3.7.1. Evaluación de hipótesis de correlación

Los coeficientes de rho de Spearman y tau de Kendall son medidas de correlación para variables en un nivel de medición ordinal; los individuos o unidades de la muestra pueden ordenarse por rangos, esta prueba de correlación no tiene suposición sobre la distribución de los datos. (Hernández et al., 2014)

Se tiene:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}$$

Las variables significan:

r_s : Coeficiente de Spearman

d: Es la diferencia entre los rangos

n: Especifica la cantidad de apreciaciones realizadas

Paso 1: Hipótesis de correlación

H_0 : No hay una correlación entre las variables “x” e “y”.

H_1 : Existe una correlación entre las variables “x” e “y”.

Paso 2: Nivel de significancia

Nivel de confianza: 0.950

Margen de error: 0.050



Paso 3: Prueba de correlación

Si es paramétrica → Coeficiente de Pearson

Para el caso que no se paramétrica → Coeficiente de Spearman

Paso 4: Criterio de decisión

Si se tiene p-valor < 0.050 se procede a rechazar la H_0

Si se tiene p-valor ≥ 0.050 aceptamos la H_0 , por consiguiente, rechazamos la H_1

En la tabla siguiente se tiene la interpretación del coeficiente de correlación se Spearman, dicho coeficiente se emplea para medir la intensidad y la orientación, se observa que los valores del coeficiente varían dentro del intervalo entre +1 y -1. Un valor (+1) indica una relación directa; por otro lado, un valor (-1) denota una conexión inversa (el incremento de una variable corresponde a la disminución de la otra).

Así mismo a medida que el valor se aproxime a 0 significa que la conexión entre las variables es pobre, lo cual sugiere una menor dependencia entre ambas variables analizadas. De esto modo, se dispone de una forma de interpretación de la dependencia estadística, siendo posible cuantificar la fuerza de la asociación y su dirección.



Tabla 13

Interpretación del coeficiente de Spearman

Valor de rho	Interpretación
-1	Negativa perfecta y grande
De -0.9 a -0.99	Negativa muy alta
De -0.70 a -0.89	Negativa alta
De -0.40 a -0.69	Negativa moderada
De -0.20 a -0.39	Negativa baja
De -0.01 a -0.19	Negativa muy baja
0	Nula
De 0.01 a 0.19	Positiva muy alta
De 0.20 a 0.39	Positiva baja
De 0.40 a 0.69	Positiva moderada
De 0.70 a 0.89	Positiva alta
De 0.90 a 0.99	Positiva muy alta
1	Positiva perfecta y grande

Nota: Extraído de Martínez y Campo (2015).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBRASANTE

Con el propósito de elaborar el perfil estratigráfico de los suelos de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira, se realizaron a cabo investigaciones a través de las calicatas a cielo abierto espaciados cada 500 m y de forma alternada con una profundidad mínima de 1.50m.

4.1.1. Análisis Granulométrico

Ha sido efectuado en las 7 calicatas excavadas, en el anexo 4 se detalla la distribución del tamaño de partículas en las hojas de cálculo para cada ensayo de granulometría.

Tabla 14

Resultados del porcentaje del peso pasante para cada malla

Calicata	Ubicación	Muestra	2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200
C-01	Km 00+500	E-01	100	100	99.5	99.1	95.0	86.6	78.0	66.4	50.0
		E-02	100	100	95.2	93.8	80.9	71.7	65.9	44.5	20.0
C-02	Km 01+000	E-01	100	100	100	99.1	95.2	92.6	86.2	74.6	61.2
		E-02	92.4	89.1	85.2	81.7	70.5	59.6	44.0	33.9	20.9
C-03	Km 01+500	E-01	100	100	100	100	98.2	95.9	93.3	86.5	77.2
C-04	Km 02+000	E-01	100	100	100	97.7	94.0	90.9	84.2	70.6	52.7
		E-02	91.5	86.9	82.0	79.5	67.9	55.5	40.5	28.1	13.7
C-05	Km 02+500	E-01	93.6	92.4	88.7	83.9	70.9	56.3	43.2	27.0	14.4
		E-02	100	100	100	94.8	77.9	68.4	62.4	40.2	21.6
C-06	Km 03+000	E-01	100	100	96.1	93.3	81.9	74.4	68.9	53.7	34.2



Calicata	Ubicación	Muestra	2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200
C-07	Km	E-01	100	100	100	99.5	95.6	91.5	86.8	72.1	53.2
	03+500	E-02	100	99.7	97.3	92.9	76.8	72.9	64.7	46.3	21.6

Nota: Elaboración propia.

4.1.2. Humedad Natural

Se tiene para las diferentes muestras ensayadas.

Tabla 15

Contenidos de humedad en los suelos de subrasante en estudio

Calicata	Ubicación	Muestra	Humedad Natural
C-01	Km 00+500	E-01	24.2 %
		E-02	28.4 %
C-02	Km 01+000	E-01	27.1 %
		E-02	31.3 %
C-03	Km 01+500	E-01	25.2 %
C-04	Km 02+000	E-01	24.3 %
		E-02	29.2 %
C-05	Km 02+500	E-01	27.0 %
		E-02	36.8 %
C-06	Km 03+000	E-01	34.4 %
C-07	Km 03+500	E-01	26.5 %
		E-02	32.6 %

Nota: Elaboración propia.

Se observa que los contenidos de humedad para todos los suelos en la subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira varia en un rango de 24.2% a 36.8%, cabe mencionar que el muestreo se hizo en temporada seca (condiciones climáticas más secas y una menor frecuencia de lluvias en la región de Puno) por lo tanto es posible afirmar que en temporadas de lluvias estos valores pueden incrementarse.

4.1.3. Límites de Consistencia (L.L. y L.P.)

En la tabla subsecuente se puede diferenciar la existencia de suelos plásticos y no plásticos, para fines de la investigación se tomarán como objeto de estudios los suelos que sean plásticos. Se determina que las muestras de suelo de las calicatas 2 y 3 denotadas como C-02 (estrato superior) y C-03 (único estrato) respectivamente, presentan los valores más desfavorables en cuanto al índice de plasticidad, presentan un 17.5% y 33.5% respectivamente.

Tabla 16

Resultados del L.L., L.P. e I.P. de los suelos de subrasante

Calicata	Ubicación	Estrato	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad
C-01	Km 00+500	E-01	36.2 %	19.8 %	16.4 %
		E-02	NP	NP	NP
C-02	Km 01+000	E-01	38.0 %	20.4 %	17.5 %
		E-02	NP	NP	NP
C-03	Km 01+500	E-01	51.5 %	18.4 %	33.1 %
C-04	Km 02+000	E-01	35.2 %	20.6 %	14.6 %
		E-02	NP	NP	NP
C-05	Km 02+500	E-01	NP	NP	NP
		E-02	NP	NP	NP
C-06	Km 03+000	E-01	21.2 %	19.7 %	1.5 %
C-07	Km 03+500	E-01	38.3 %	21.5 %	16.8 %
		E-02	23.5 %	21.4 %	2.1 %

Nota: Elaboración propia.

4.1.4. Clasificación

Los distintos tipos de suelos hallados se pueden caracterizar por el tamaño de las partículas y su condición de plasticidad en función del contenido de

humedad. A continuación, se presentan una tabla donde se especifica la clasificación de las muestras analizadas.

Tabla 17

Clasificación de suelos

Calicata	Ubicación	Muestra	SUCS	AASHTO	Índice de grupo
C-01	Km 00+500	E-01	CL	A-6	6
		E-02	SM	A-1-b	0
C-02	Km 01+000	E-01	CL	A-6	8
		E-02	GM	A-1-b	0
C-03	Km 01+500	E-01	CH	A-7-6	14
C-04	Km 02+000	E-01	CL	A-6	5
		E-02	GM	A-1-a	0
C-05	Km 02+500	E-01	GM	A-1-a	0
		E-02	SM	A-1-b	0
C-06	Km 03+000	E-01	SM	A-2-4	0
C-07	Km 03+500	E-01	CL	A-6	6
		E-02	SM	A-1-b	0

Nota: Elaboración propia.

Se observa que de acuerdo al método SUCS, se tiene que 4 muestras analizadas son clasificadas como CL (arcillas de baja plasticidad), 1 muestra se clasifica como CH (arcillas de alta plasticidad), 4 muestras se clasifican como SM (arenas limosas) y finalmente 3 muestras se clasifican como GM (gravas limosas). Así mismo según el método AASHTO, los suelos que presentan los índices de grupo más altos corresponden a las calicatas C-02 (estrato superior) y C-03 (único estrato). Por tanto, las muestras de suelos que presentan características más desfavorables para su empleo como subrasante corresponden a las calicatas C-02 y C-03.

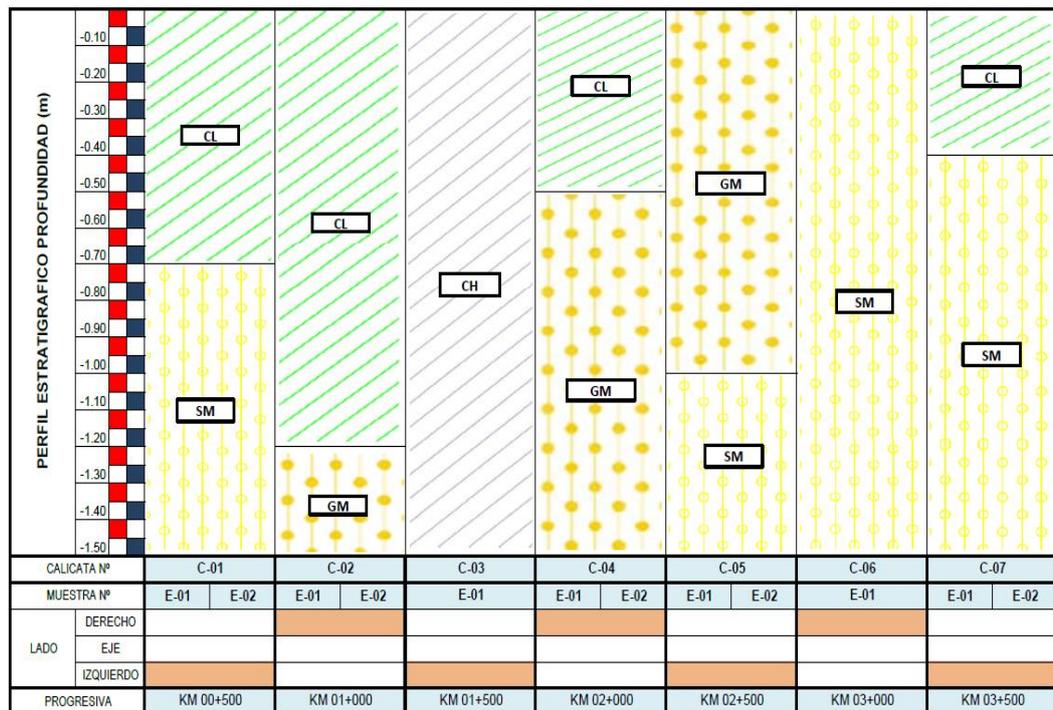
4.1.5. Perfil estratigráfico

Para la elaboración del perfil estratigráfico se registraron la ubicación del lugar de muestreo, los espesores de cada tipo de suelo, así como los respectivos ensayos para su caracterización. También se precisa que no se detectó el nivel freático (N.F.) en los puntos de exploración efectuadas debido a que fue realizado en temporada seca en la región de Puno.

Con base en los resultados se decide estudiar el material proveniente de las calicatas C-02 (estrato superior) y C-03 (único estrato), las cuales serán objeto de análisis en el presente trabajo de investigación.

Figura 25

Perfil estratigráfico del camino vecinal Pallalla - Totojira



Nota: Elaboración propia.

4.2. PROPIEDADES DE PLASTICIDAD DE SUELOS ARCILLOSOS

Como se estableció anteriormente, las muestras de suelo a evaluar, comprenden el suelo tipo CL identificado en el estrato superior de la calicata C-02 y al suelo tipo CH identificado en la calicata C-03, además con el fin de asegurar un mayor grado de confiabilidad en los resultados de los ensayos de laboratorio, se llevaron a cabo pruebas utilizando 2 muestras en cada tipo suelo (CL y CH). Esta estrategia refuerza la validez de los resultados al proporcionar una base más sólida para la comparación y análisis respectivo.

4.2.1. Resultados de límite líquido de la subrasante arcillosa

Mediante los ensayos realizados, para el caso del suelo CL, se determinó que el L.L. del suelo natural es de 38.32%, en cambio con la presencia de la ceniza de fondo y cal resulta en una disminución leve respecto a su valor inicial llegando al valor de 34.27% lo que representa una variación de -10.57%.

Tabla 18

Variación del L.L. en suelos CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal

Suelo: CL				
Dosificación	M-1 L. L. (%)	M-2 L. L. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	37.97	38.66	38.32	0.00%
S97-CF0-C3	36.26	35.28	35.77	-6.64%
S94-CF3-C3	36.22	35.50	35.86	-6.41%
S91-CF6-C3	35.97	35.04	35.51	-7.33%
S88-CF9-C3	36.32	34.77	35.55	-7.23%
S85-CF12-C3	34.84	33.69	34.27	-10.57%

Nota: Elaboración propia.

Para el caso del suelo CH, se tiene que el L.L. del suelo natural es de 51.81% y a medida que se adiciona la ceniza de fondo y cal dicho valor disminuye, similar al caso anterior, obteniéndose un valor de 44.27% lo que representa una variación de -14.54% respecto al suelo inicial, se muestra la siguiente tabla.

Tabla 19

Variación del L.L. en suelos CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal

Suelo: CH				
Dosificación	M-1 L. L. (%)	M-2 L. L. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	51.49	52.12	51.81	0.00%
S97-CF0-C3	48.68	47.84	48.26	-6.84%
S94-CF3-C3	48.34	46.79	47.57	-8.18%
S91-CF6-C3	48.12	47.23	47.68	-7.97%
S88-CF9-C3	46.46	45.54	46.00	-11.21%
S85-CF12-C3	43.51	45.03	44.27	-14.54%

Nota: Elaboración propia.

Se aprecia para ambos casos que la inclusión de ceniza de fondo y cal disminuye levemente el L.L., sin embargo, esto es más pronunciado en el caso del suelo tipo CH en la dosificación S85-CF12-C3 se registra una mayor variación con respecto al suelo inicial.

4.2.2. Resultados del límite plástico de la subrasante arcillosa

Mediante los ensayos para el suelo clasificado como CL, se calculó que el L.P. del suelo natural es 20.97%, al agregar la ceniza de fondo y la cal estos valores aumentaron enormemente.

Tabla 20*Variación del L.P. en suelos CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal*

Suelo: CL				
Dosificación	M-1 L. P. (%)	M-2 L. P. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	20.44	21.49	20.97	0.00%
S97-CF0-C3	25.85	25.74	25.80	23.04%
S94-CF3-C3	25.90	26.38	26.14	24.68%
S91-CF6-C3	27.88	27.09	27.49	31.10%
S88-CF9-C3	28.75	28.16	28.46	35.73%
S85-CF12-C3	30.38	29.05	29.72	41.74%

Nota: Elaboración propia.

Para el caso del suelo CH, se ha determinado que el L.P. del suelo natural es de 17.82%. Si embargo, a medida que se adiciona la ceniza de fondo y cal como aditivos estabilizantes se observa un incremento de dicho valor, lo cual se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 21*Variación del L.P. en suelos CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal*

Suelo: CH				
Dosificación	M-1 L. P. (%)	M-2 L. P. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	18.41	17.22	17.82	0.00%
S97-CF0-C3	27.61	29.10	28.36	59.16%
S94-CF3-C3	27.65	28.92	28.29	58.77%
S91-CF6-C3	30.37	30.24	30.31	70.11%
S88-CF9-C3	32.09	32.48	32.29	81.22%
S85-CF12-C3	34.52	36.42	35.47	99.10%

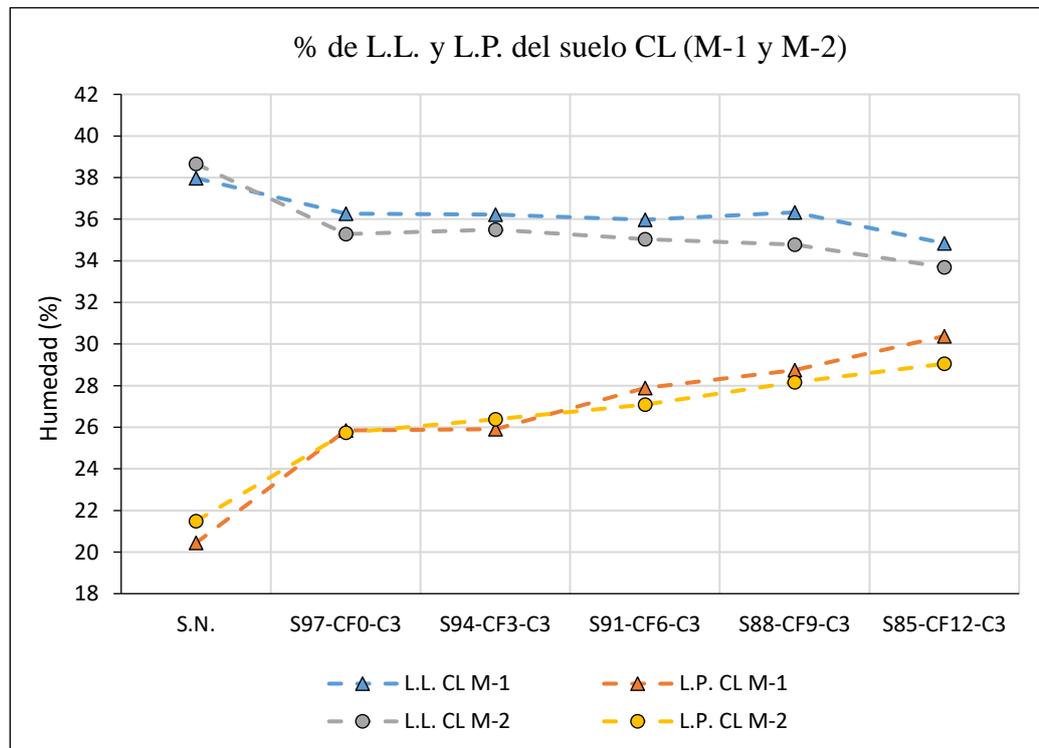
Nota: Elaboración propia.

Se evidencia que para ambos casos la adición de ceniza de fondo y cal resulta en un aumento considerablemente del L.P., en el suelo tipo CL, específicamente en la dosificación S85-CF12-C3 se obtiene un valor de 29.72% mientras que para el suelo tipo CH en la dosificación S85-CF12-C3 el cambio es aún más notable alcanzando el valor de 35.47%.

A continuación, se muestra los gráficos que ilustran la variación del L.L. y el L.P. en los suelos clasificados como CL y CH, estos gráficos comparan los resultados obtenidos para las muestras M-1 y M-2 respectivamente, se visualiza las diferencias y similitudes en el comportamiento de cada tipo de suelos analizados con las mismas condiciones de ensayo.

Figura 26

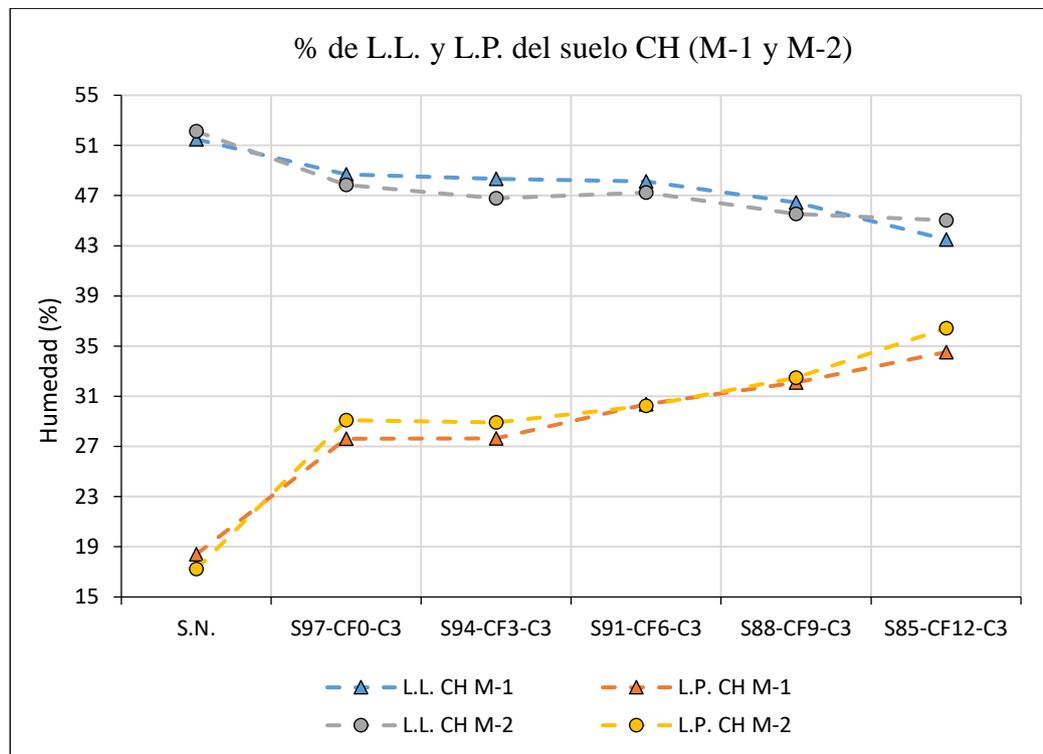
L.L. y L.P. del suelo CL con ceniza de fondo y cal



Nota: Elaboración propia.

Figura 27

L.L. y L.P. del suelo CL con ceniza de fondo y cal



Nota: Elaboración propia.

Para ambos casos, se evidencia una tendencia similar, conforme se adicionan porcentajes mayores de ceniza de fondo y cal el valor de L.L. disminuye su valor, mientras que para el caso del L.P. sus valores se incrementan.

4.2.3. Resultados del índice de plasticidad de la subrasante arcillosa

La tabla siguiente se evidencia los índices de plasticidad obtenidos para el suelo clasificado como CL, se tiene que el suelo natural (suelo patrón) dispone de un I.P. de 17.35 %, el cual lo clasifica como un suelo de baja plasticidad, también se observa que la incorporación de los aditivos estabilizantes resulta en una notable disminución en el I.P., especialmente con la segunda dosificación S97-CF0-C3 pues para el resto de dosificaciones el cambio del I.P. ya no es tan

pronunciado, aquí se puede deducir la mayor efectividad de la cal con respecto a la ceniza de fondo para mejorar esta propiedad.

Tabla 22

Valores del I.P. en suelos CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal

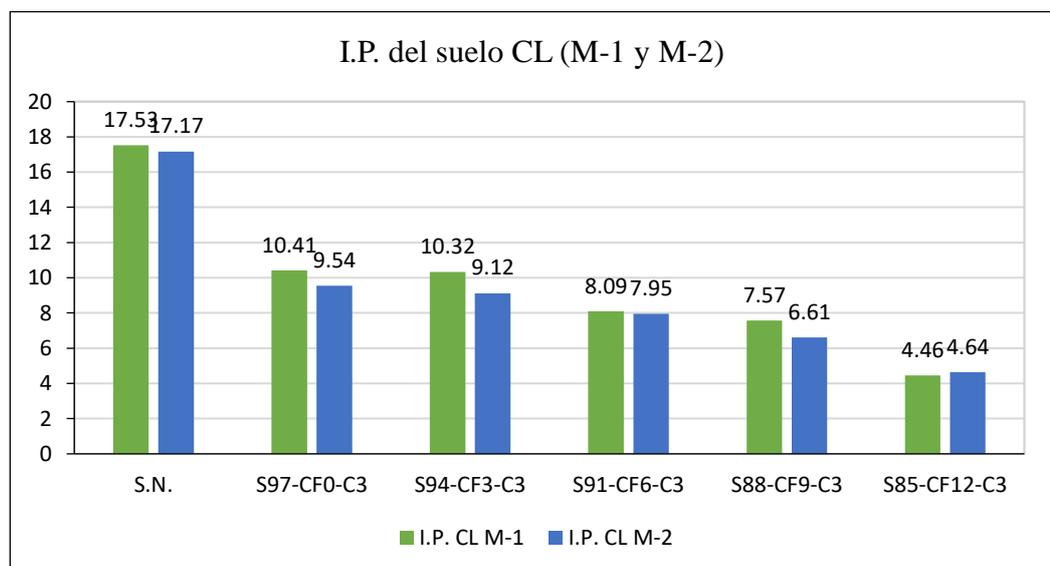
Suelo: CL				
Dosificación	M-1 I. P. (%)	M-2 I. P. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	17.53	17.17	17.35	0.00%
S97-CF0-C3	10.41	9.54	9.98	-42.51%
S94-CF3-C3	10.32	9.12	9.72	-43.98%
S91-CF6-C3	8.09	7.95	8.02	-53.78%
S88-CF9-C3	7.57	6.61	7.09	-59.14%
S85-CF12-C3	4.46	4.64	4.55	-73.78%

Nota: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico de barras se puede observar la reducción de los valores del I.P. conforme se va adicionando los aditivos estudiados.

Figura 28

I.P. del suelo CL con adición de ceniza de fondo y cal



Nota: Elaboración propia.

Con respecto al suelo tipo CH, el suelo patrón posee un I.P. elevado de 33.99 %, clasificándolo como un suelo de alta plasticidad, así mismo se observa que la adición de los aditivos estabilizantes baja dicho valor, esto sirve como indicador de la mejora de capacidad portante.

Tabla 23

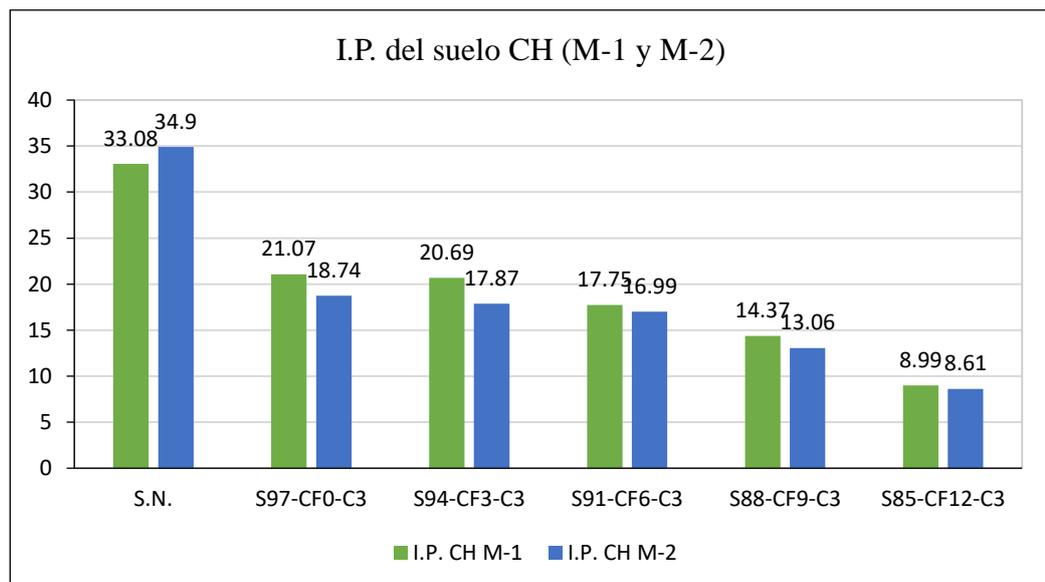
Valores del I.P. en suelos CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal

Suelo: CH				
Dosificación	M-1 I. P. (%)	M-2 I. P. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	33.08	34.90	33.99	0.00%
S97-CF0-C3	21.07	18.74	19.91	-41.44%
S94-CF3-C3	20.69	17.87	19.28	-43.28%
S91-CF6-C3	17.75	16.99	17.37	-48.90%
S88-CF9-C3	14.37	13.06	13.72	-59.65%
S85-CF12-C3	8.99	8.61	8.80	-74.11%

Nota: Elaboración propia.

Figura 29

I.P. del suelo CH con adición de ceniza de fondo y cal

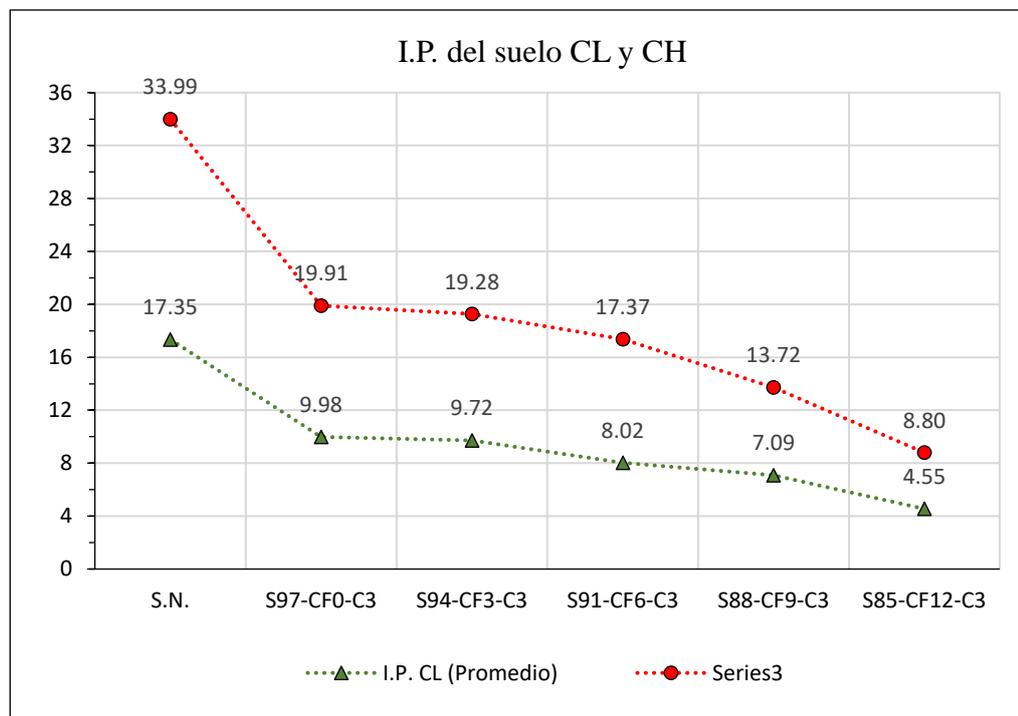


Nota: Elaboración propia.

El siguiente grafico engloba los valores del I.P. promedio tanto para el suelo CL y CH, se observa que los aditivos incorporados al suelo CL son más efectivos en comparación con el suelo CH, pues logran una mayor reducción del parámetro evaluado, logrando alcanzar valores de I.P. de 4.55 y 8.80 para el suelo CL y CH respectivamente.

Figura 30

I.P. promedio en suelos CL y CH con ceniza de fondo más cal



Nota: Elaboración propia.

4.3. PROPIEDADES DE M.D.S. Y EL O.C.H. DE SUELOS ARCILLOSOS

4.3.1. Resultados de la máxima densidad seca de la subrasante arcillosa

Para el caso del suelo CL en la tabla a continuación se muestran los valores obtenidos, para la máxima densidad seca en el suelo patrón (suelo natural) es 1.777 g/cm³, se observa que disminuye a medida que se va adicionando la ceniza de fondo y cal.

Tabla 24*Valores de la M.D.S. en CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal*

Suelo: CL				
Dosificación	M-1 M.D.S. (g/cm³)	M-2 M.D.S. (g/cm³)	Promedio	Variación (%)
S.N.	1.772	1.781	1.777	0.00%
S97-CF0-C3	1.769	1.769	1.769	-0.42%
S94-CF3-C3	1.768	1.762	1.765	-0.65%
S91-CF6-C3	1.755	1.746	1.751	-1.46%
S88-CF9-C3	1.737	1.726	1.732	-2.53%
S85-CF12-C3	1.714	1.698	1.706	-3.97%

Nota: Elaboración propia.

En relación al suelo de tipo CH, la densidad máxima registrada para el suelo natural (patrón) fue 1.753 g/cm³. Al igual que el anterior caso la tendencia de la máxima densidad seca es descendente, indicando una disminución conforme se incorpora ceniza de fondo y cal.

Tabla 25*Valores de la M.D.S. en CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal*

Suelo: CH				
Dosificación	M-1 M.D.S. (g/cm³)	M-2 M.D.S. (g/cm³)	Promedio	Variación (%)
S.N.	1.750	1.755	1.753	0.00%
S97-CF0-C3	1.740	1.736	1.738	-0.83%
S94-CF3-C3	1.734	1.725	1.730	-1.31%
S91-CF6-C3	1.713	1.702	1.708	-2.57%
S88-CF9-C3	1.698	1.688	1.693	-3.40%
S85-CF12-C3	1.672	1.661	1.667	-4.91%

Nota: Elaboración propia.

4.3.2. Resultados del óptimo contenido de humedad de la subrasante

arcillosa

Según la tabla siguiente para el suelo CL, la humedad óptima promedio del suelo patrón es 14.95 %, conforme se adiciona la ceniza de fondo y cal este parámetro tiende a aumentar, pues el reemplazo de material arcilloso por ceniza y cal se traduce en una mayor capacidad de absorción de agua.

Tabla 26

Valores del O.C.H. en CL (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal

Suelo: CL				
Dosificación	M-1 O.C.H. (%)	M-2 O.C.H. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	14.85	15.04	14.95	0.00%
S97-CF0-C3	15.27	15.65	15.46	3.45%
S94-CF3-C3	15.87	15.80	15.84	5.96%
S91-CF6-C3	16.20	16.39	16.30	9.03%
S88-CF9-C3	16.58	16.67	16.63	11.24%
S85-CF12-C3	17.28	17.41	17.35	16.06%

Nota: Elaboración propia.

En lo que respecta al suelo tipo CH, se identifica que el óptimo contenido de humedad para el suelo natural fue de 16.90 %, a medida que se introduce la ceniza de fondo y cal, este parámetro tiende a incrementarse.

Estos resultados del mismo modo que el anterior caso puede explicarse por la capacidad mayor de la ceniza de fondo y cal de absorber agua en comparación al suelo natural.



Tabla 27

Valores del O.C.H. en CH (M-1 y M-2) con ceniza de fondo y cal

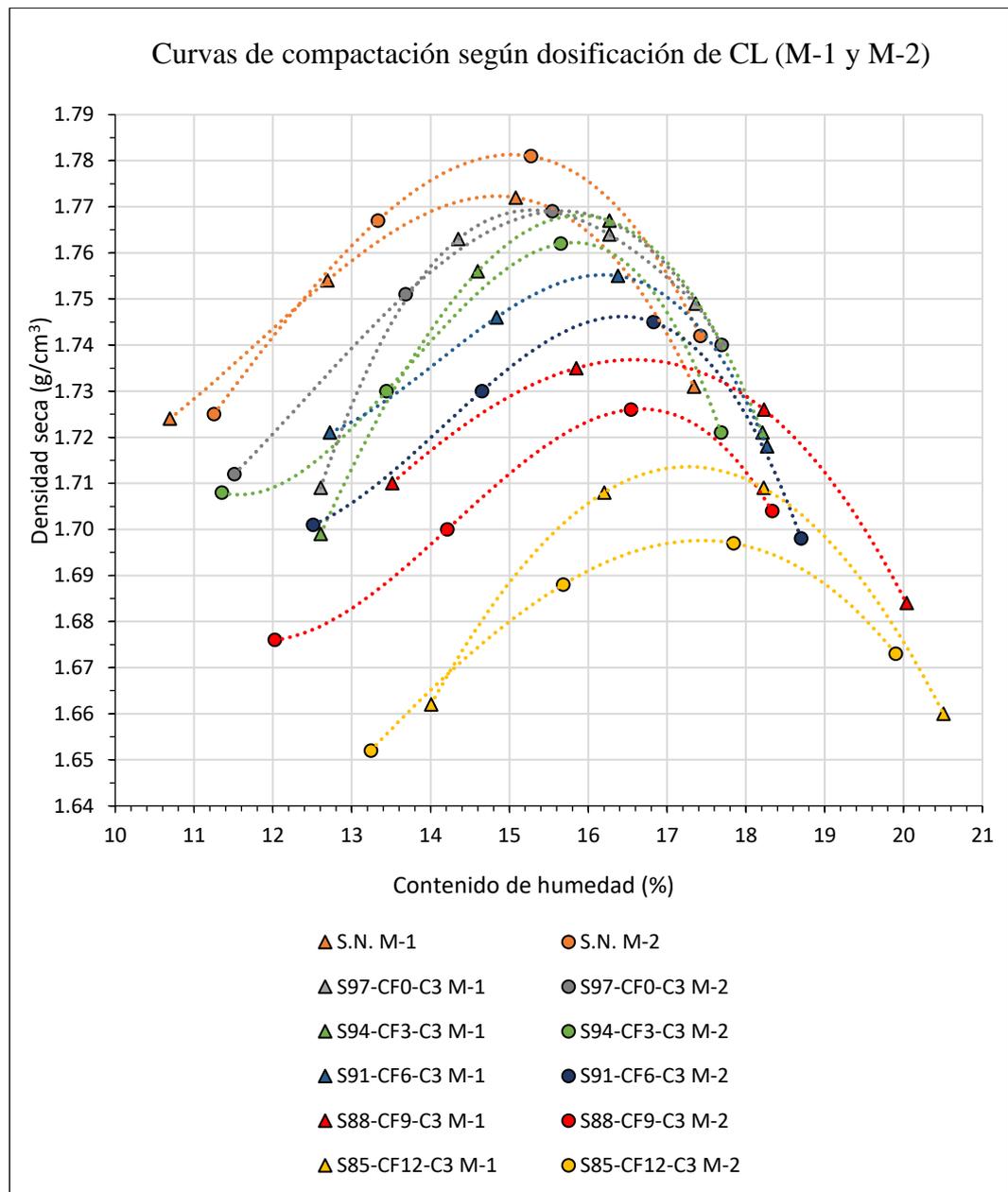
Suelo: CL				
Dosificación	M-1 O.C.H. (%)	M-2 O.C.H. (%)	Promedio	Variación (%)
S.N.	17.06	16.73	16.90	0.00%
S97-CF0-C3	17.46	17.18	17.32	2.52%
S94-CF3-C3	17.72	17.97	17.85	5.62%
S91-CF6-C3	18.10	18.39	18.25	7.99%
S88-CF9-C3	18.94	19.49	19.22	13.73%
S85-CF12-C3	20.11	20.50	20.31	20.18%

Nota: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los registros de curvas de compactación correspondientes a los suelos clasificados como CL y CH, en el eje vertical izquierdo se tiene las densidades secas obtenidas para cada punto evaluado (expresado en g/cm^3), mientras que en el eje horizontal se ordenan los contenidos de humedad determinados para cada ensayo.

Figura 31

Registro de curvas de compactación del suelo CL

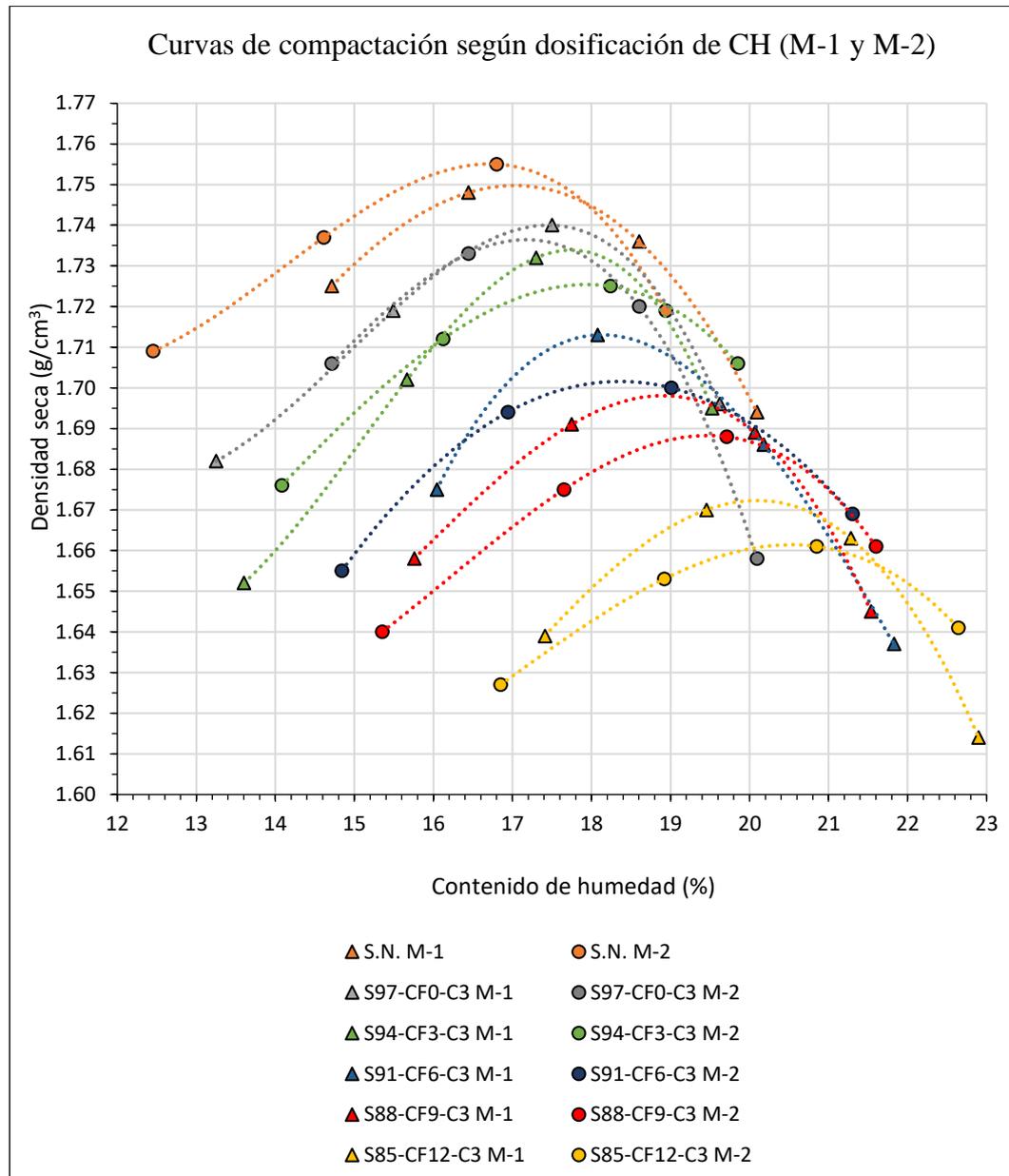


Nota: Elaboración propia.

Se aprecia una similitud en el comportamiento de los parámetros de compactación ya que ambos suelos en estudio son de naturaleza arcillosa. Así mismo en ambas situaciones las propiedades de máxima densidad seca disminuyen levemente su valor mientras que el óptimo contenido de humedad se incrementa conforme se va adicionando ceniza de fondo y cal.

Figura 32

Registro de curvas de compactación del suelo CH

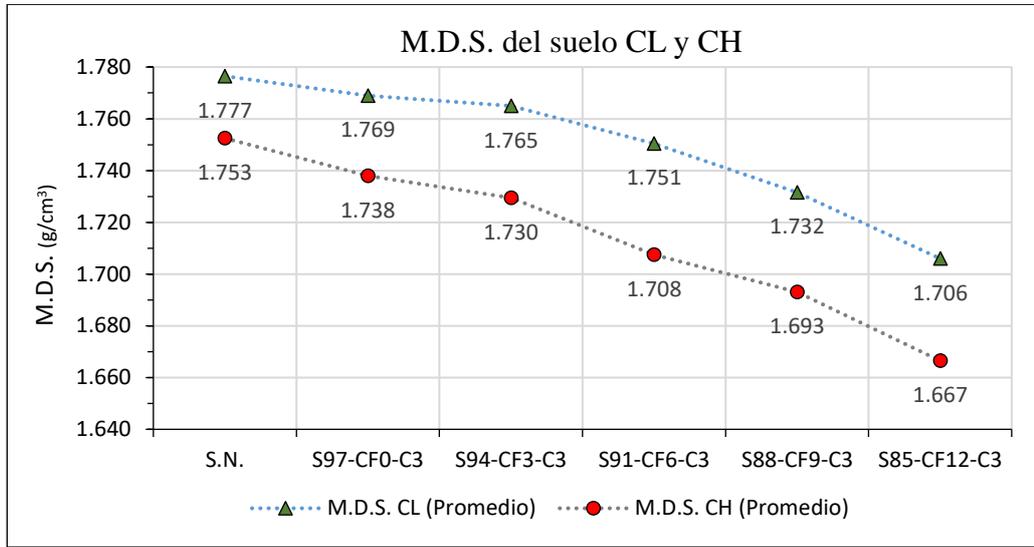


Nota: Elaboración propia.

También se observa que, al aumentar las dosificaciones de ceniza de fondo en combinación con un 3% de cal (manteniendo este porcentaje constante en todos los casos), la propiedad de máxima densidad seca disminuye progresivamente en ambos tipos de suelo, debido a que las cenizas es un material muy ligero y fino.

Figura 33

Decremento de la M.D.S. del suelo CL y CH

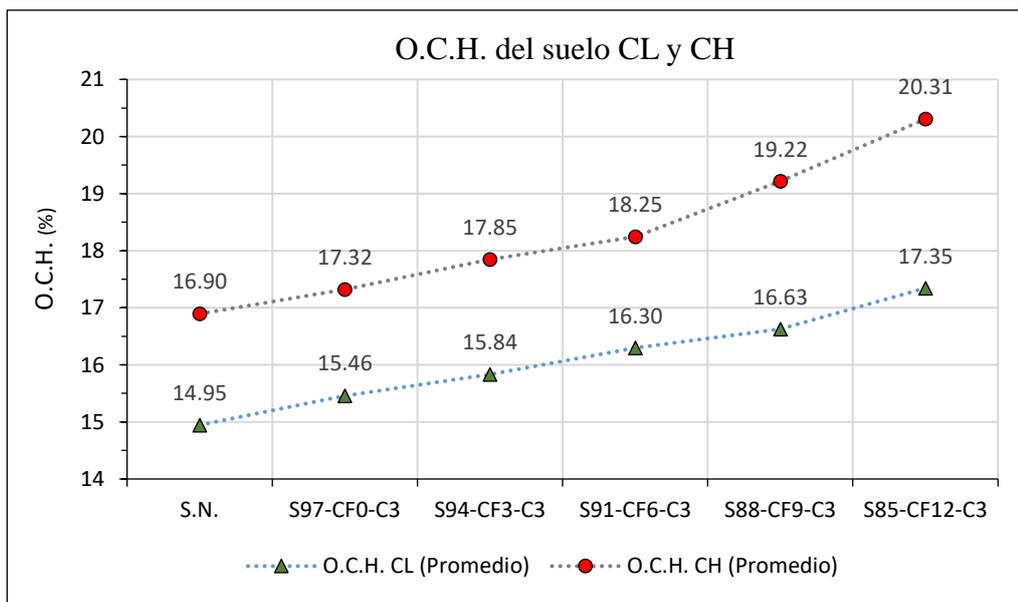


Nota: Elaboración propia.

Por otro lado, el parámetro del óptimo contenido de humedad aumenta conforme se adiciona cantidades mayores de ceniza de fondo en combinación con cal, debido a la mayor capacidad de absorción de humedad de la ceniza de fondo.

Figura 34

Incremento del O.C.H. del suelo CL y CH



Nota: Elaboración propia.

Tabla 28

Valores de la M.D.S. vs O.C.H. del suelo CL y CH

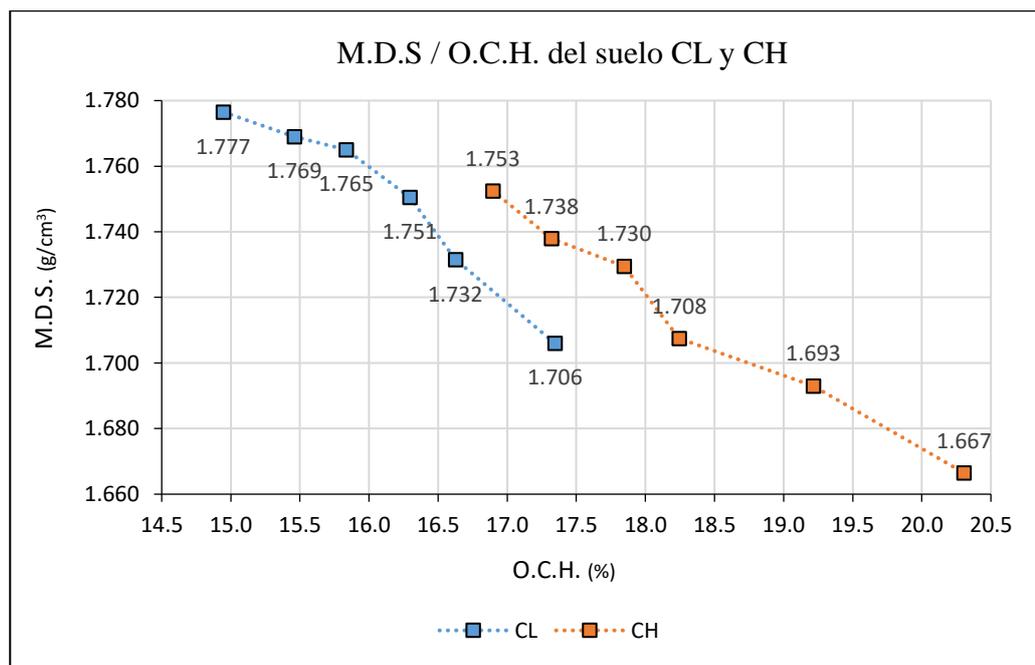
Dosificación	Suelo: CL		Suelo: CH	
	M.D.S. (g/cm ³)	O.C.H. (%)	M.D.S. (g/cm ³)	O.C.H. (%)
S.N.	1.777	14.95	1.753	16.90
S97-CF0-C3	1.769	15.46	1.738	17.32
S94-CF3-C3	1.765	15.84	1.730	17.85
S91-CF6-C3	1.751	16.30	1.708	18.25
S88-CF9-C3	1.732	16.63	1.693	19.22
S85-CF12-C3	1.706	17.35	1.667	20.31

Nota: Elaboración propia.

Así mismo se puede inferir que, a medida que la M.D.S. disminuye su valor, el O.C.H. tiende a aumentar para ambos casos de suelo, con los aditivos estabilizadores del presente estudio.

Figura 35

Variación de los parámetros de compactación con ceniza y cal



Nota: Elaboración propia.

4.4. ÍNDICE DE CAPACIDAD DE SOPORTE

En relación al suelo tipo CL se observa que gracias a la adición de ceniza de fondo y cal este parámetro incrementa su valor, mejorando las características de resistencia del suelo arcilloso en estudio.

Con la dosificación S85-CF12-C3 (85% de suelo + 12% de ceniza de fondo + 3% de cal), se logra un valor al 95% de 17.6% y para el 100%, se logra 20.0%, cabe destacar que estos valores corresponden al promedio de las muestras M-1 y M-2.

Tabla 29

CBR al 95% y al 100% del suelo CL con ceniza de fondo y cal

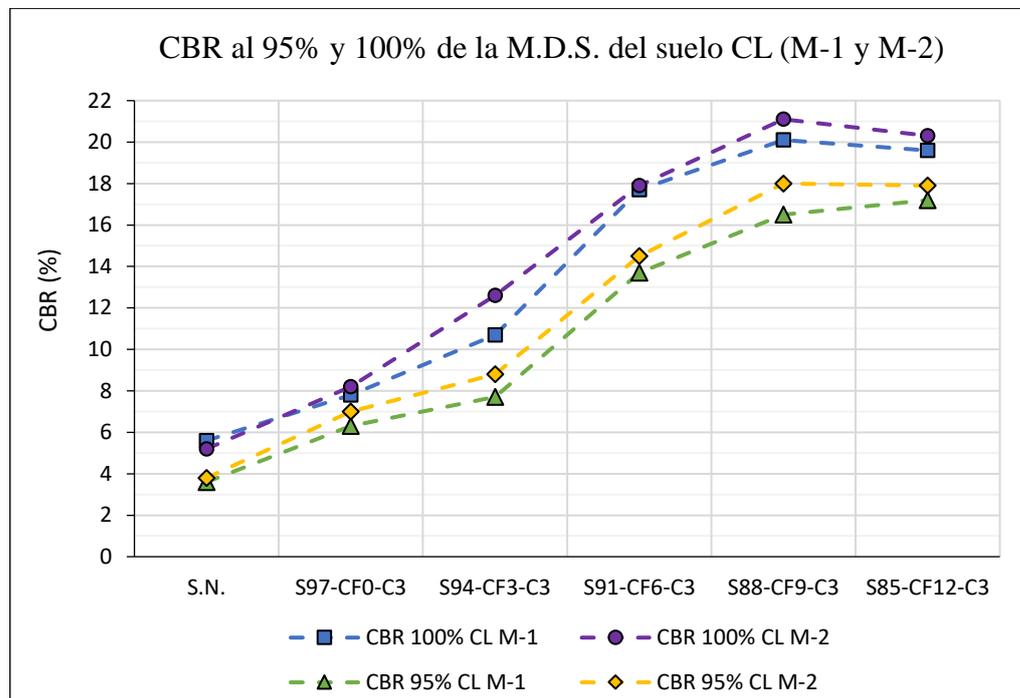
Suelo: CL						
Dosificación	M-1 CBR (95%)	M-2 CBR (95%)	Promedio	M-1 CBR (100%)	M-2 CBR (100%)	Promedio
S.N.	3.6	3.8	3.7	5.6	5.2	5.4
S97-CF0-C3	6.3	7.0	6.7	7.8	8.2	8.0
S94-CF3-C3	7.7	8.8	8.3	10.7	12.6	11.7
S91-CF6-C3	13.7	14.5	14.1	17.7	17.9	17.8
S88-CF9-C3	16.5	18.0	17.3	20.1	21.1	20.6
S85-CF12-C3	17.2	17.9	17.6	19.6	20.3	20.0

Nota: Elaboración propia.

En la figura a continuación se detalla los valores calculados tanto para el CBR al 95 y 100 por ciento conforme se va incluyendo los aditivos objeto de estudio.

Figura 36

Resultados del CBR para el suelo CL con ceniza de fondo y cal



Nota: Elaboración propia.

Para el suelo tipo CH, la mejora del suelo arcilloso en estudio es evidente en la dosificación S85-CF12-C3, logrando un CBR del 95% de 10.0% y del 100% a 11.7%.

Tabla 30

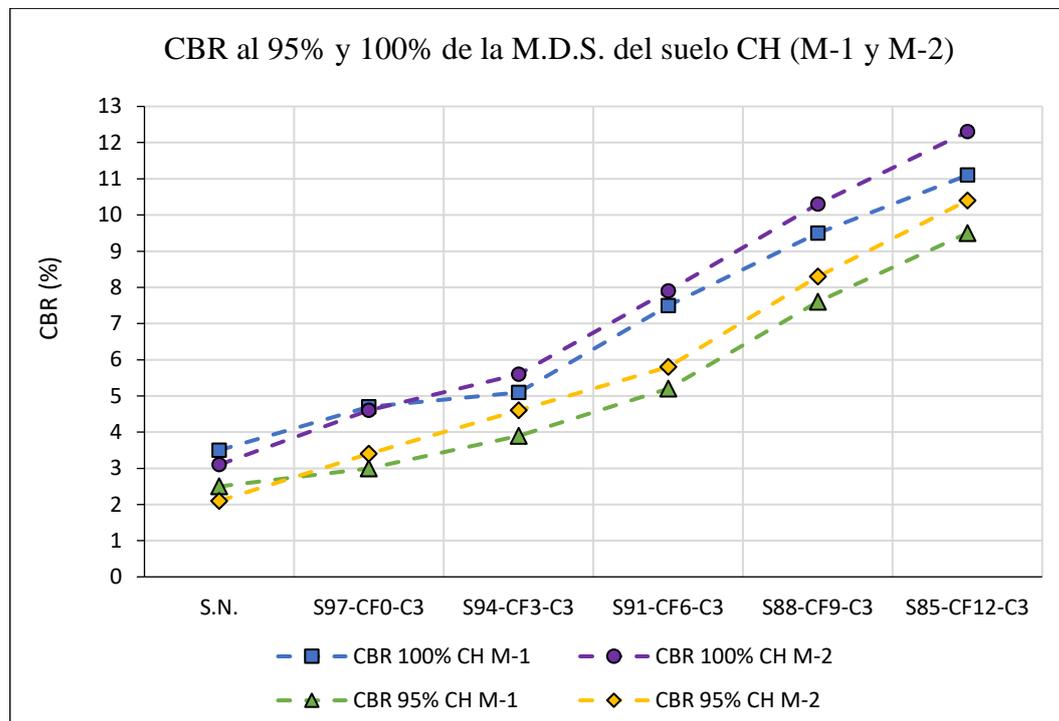
CBR al 95% y al 100% del suelo CH con ceniza de fondo y cal

Suelo: CH						
Dosificación	M-1	M-2	Promedio	M-1	M-2	Promedio
	CBR (95%)	CBR (95%)		CBR (100%)	CBR (100%)	
S.N.	2.5	2.1	2.3	3.5	3.1	3.3
S97-CF0-C3	3.0	3.4	3.2	4.7	4.6	4.7
S94-CF3-C3	3.9	4.6	4.3	5.1	5.6	5.4
S91-CF6-C3	5.2	5.8	5.5	7.5	7.9	7.7
S88-CF9-C3	7.6	8.3	8.0	9.5	10.3	9.9
S85-CF12-C3	9.5	10.4	10.0	11.1	12.3	11.7

Nota: Elaboración propia.

Figura 37

Resultados del CBR para el suelo CH con ceniza de fondo y cal



Nota: Elaboración propia.

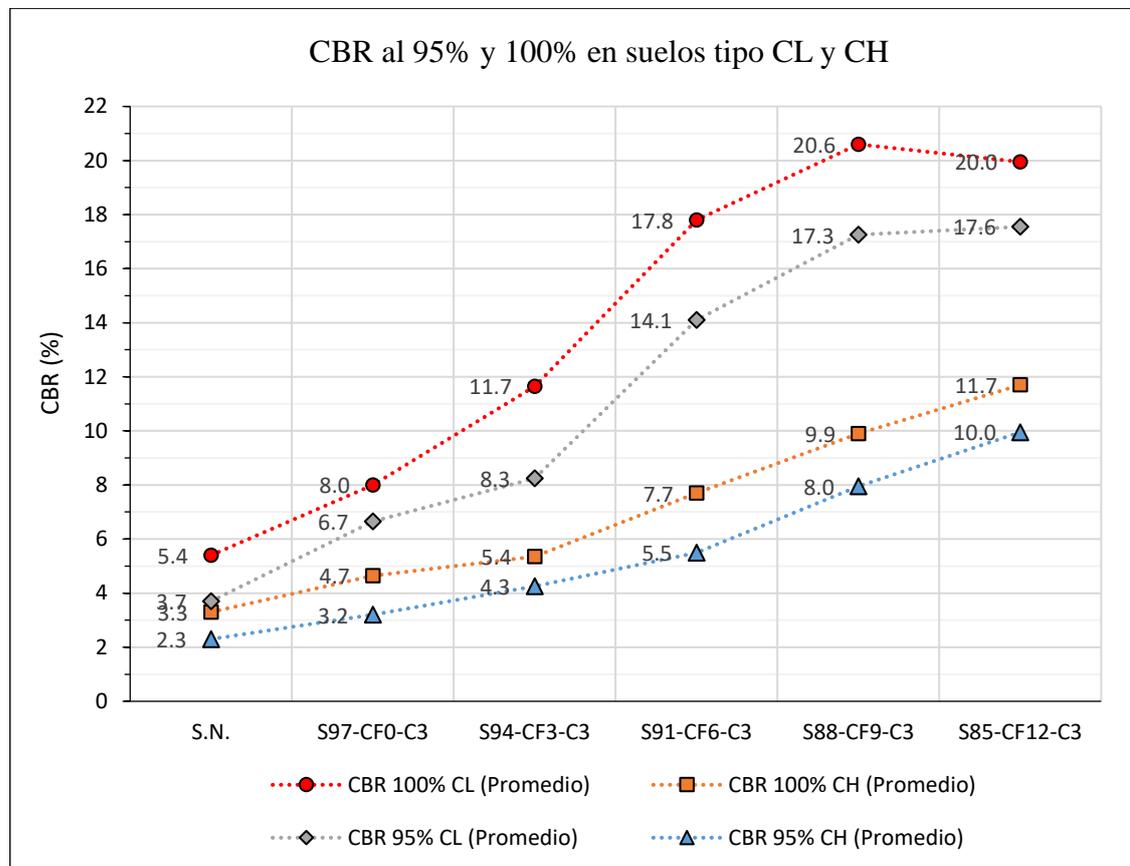
La incorporación de ceniza de fondo y cal es más aprovechable para el suelo tipo CL (arcilla de baja plasticidad), pues mejora significativamente el valor del CBR al 100% pasando de 5.4% en el suelo natural llegando a un máximo de 20.6% para la dosificación S88-CF9-C3.

En contraste para el suelo tipo CH (arcilla de alta plasticidad) el incremento en el valor CBR al 100% es más modesto, pasando de 3.3% a 11.7% en la dosificación S85-CF12-C3.

Con esta información se demuestra una mayor efectividad de los aditivos en el suelo tipo CL en comparación con el suelo tipo CH, de ahí la importancia de seleccionar adecuadamente los aditivos en función del tipo de suelo que se tiene en campo para mejorar sus propiedades ingenieriles.

Figura 38

Variación del CBR en los suelos CL y CH con ceniza de fondo y cal



Nota: Elaboración propia.

4.5. PORCENTAJE DE EXPANSIÓN

Se tomaron control de las lecturas de expansión para el suelo tipo CL y CH, utilizando 2 muestras por cada suelo, con el fin de evaluar cómo los aditivos estabilizadores influyen en el grado de expansión por cada dosificación estudiada.

Así mismo la incorporación de ceniza de fondo y cal disminuye a medida que agregamos estos insumos, la expansión del suelo natural CL (para 56 goles en 4 días) es de 3.16%, para la dosificación S85-CF12-C3 se obtuvo una expansión (para 56 goles en 4 días) de 0.82%. También es importante destacar la dosificación S97-CF0-C3, donde se

aprecia claramente la acción de la cal en el suelo tipo CL, la cual reduce de manera significativa el valor de la expansión.

Tabla 31

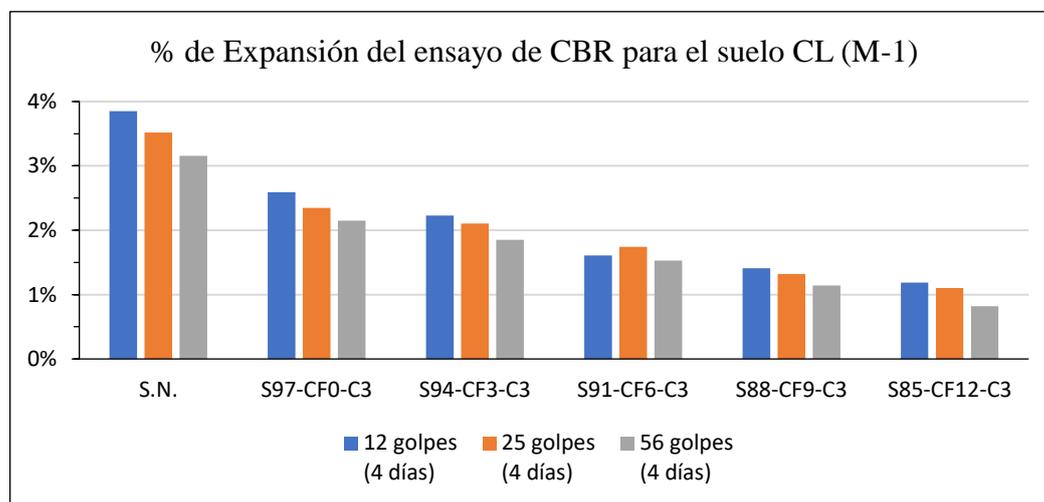
Grado de expansión del suelo CL (M-1) con ceniza de fondo y cal

Suelo CL (M-1)			
Dosificaciones	12 G.	25 G.	56 G.
S.N.	3.85 %	3.52 %	3.16 %
S97-CF0-C3	2.59 %	2.35 %	2.15 %
S94-CF3-C3	2.23 %	2.10 %	1.85 %
S91-CF6-C3	1.61 %	1.74 %	1.53 %
S88-CF9-C3	1.41 %	1.32 %	1.14 %
S85-CF12-C3	1.19 %	1.10 %	0.82 %

Nota: Elaboración propia.

Figura 39

Variación de las expansiones en el suelo CL (M-1)



Nota: Elaboración propia.

También se muestra los resultados para la muestra M-2 del tipo de suelo CL, la expansión del suelo natural CL (para 56 goles en 4 días) es de 3.40% y para la dosificación S85-CF12-C3 se obtuvo una expansión (para 56 goles en 4 días) de 1.03%. Del mismo

modo para el caso de la muestra M-1 se aprecia la acción de la cal al mejorar dicha propiedad con respecto a las demás dosificaciones.

Tabla 32

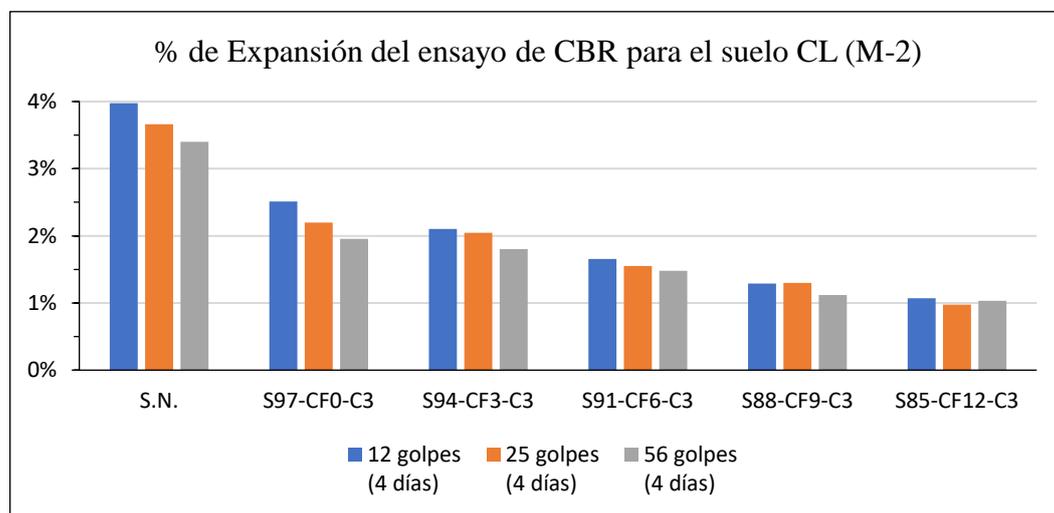
Grado de expansión del suelo CL (M-2) con ceniza de fondo y cal

Suelo CL (M-2)			
Dosificaciones	12 G.	25 G.	56 G.
S.N.	3.98 %	3.66 %	3.40 %
S97-CF0-C3	2.51 %	2.20 %	1.95 %
S94-CF3-C3	2.10 %	2.05 %	1.80 %
S91-CF6-C3	1.65 %	1.55 %	1.48 %
S88-CF9-C3	1.29 %	1.30 %	1.12 %
S85-CF12-C3	1.07 %	0.98 %	1.03 %

Nota: Elaboración propia.

Figura 40

Variación de las expansiones en el suelo CL (M-2)



Nota: Elaboración propia.

En relación con el suelo tipo CH al analizar los resultados obtenidos, que se presentan en la siguiente tabla, se evidencia que incorporando porciones de ceniza de fondo y cal conlleva una disminución al parámetro de expansión. La expansión medida

para 56 golpes en un lapso de tiempo de 4 días, se reduce de 6.61% a 2.54% con la dosificación S85-CF12-C3.

Tabla 33

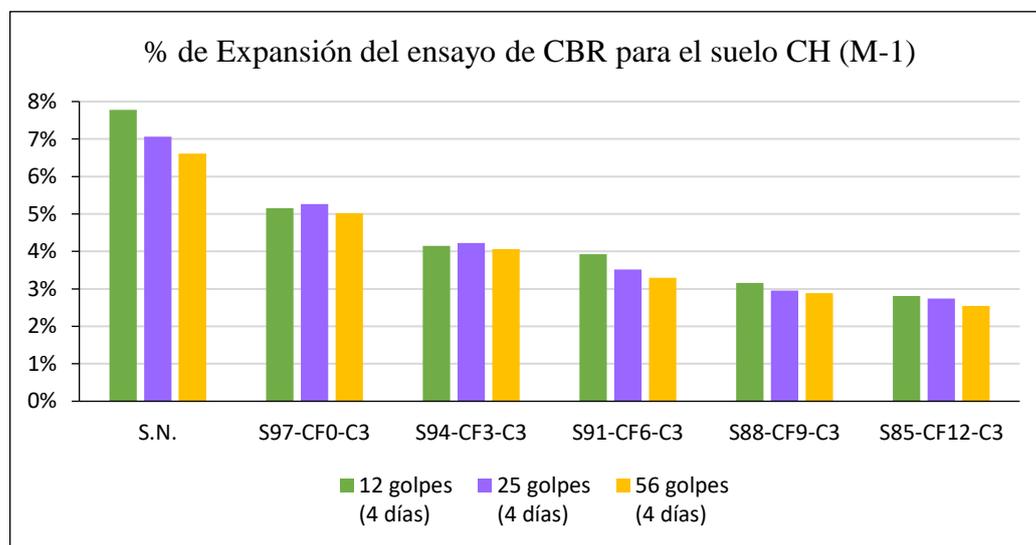
Grado de expansión del suelo CH (M-1) con ceniza de fondo y cal

Suelo CH (M-1)			
Dosificaciones	12 G.	25 G.	56 G.
S.N.	7.78 %	7.06 %	6.61 %
S97-CF0-C3	5.15 %	5.26 %	5.02 %
S94-CF3-C3	4.15 %	4.22 %	4.06 %
S91-CF6-C3	3.93 %	3.52 %	3.30 %
S88-CF9-C3	3.16 %	2.95 %	2.89 %
S85-CF12-C3	2.81 %	2.74 %	2.54 %

Nota: Elaboración propia.

Figura 41

Variaciones de las expansiones en el suelo CH (M-1)



Nota: Elaboración propia.

Asimismo, se presentan los resultados para la muestra M-2 del tipo de suelo CH, donde la expansión del suelo natural CH (para 56 golpes en un periodo de 4 días) fue de

6.71%; en contraste, para la dosificación S85-CF12-C3, el grado de expansión se redujo positivamente a 2.35%.

Tabla 34

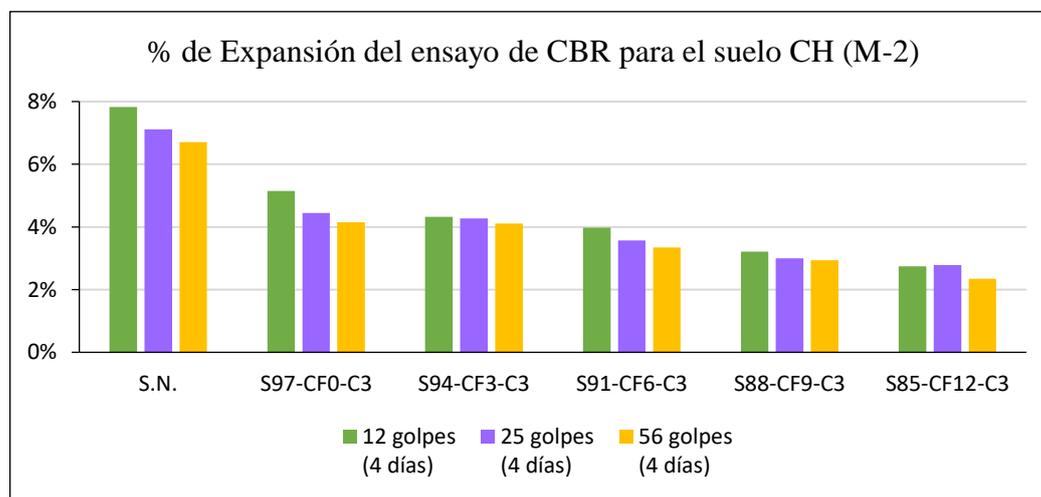
Grado de expansión del suelo CH (M-2) con ceniza de fondo y cal

Suelo CH (M-2)			
Dosificaciones	12 G.	25 G.	56 G.
S.N.	7.83 %	7.11 %	6.71 %
S97-CF0-C3	5.15 %	4.45 %	4.15 %
S94-CF3-C3	4.32 %	4.27 %	4.11 %
S91-CF6-C3	3.98 %	3.57 %	3.35 %
S88-CF9-C3	3.21 %	3.00 %	2.94 %
S85-CF12-C3	2.75 %	2.79 %	2.35 %

Nota: Elaboración propia.

Figura 42

Variaciones de las expansiones en el suelo CH (M-2)



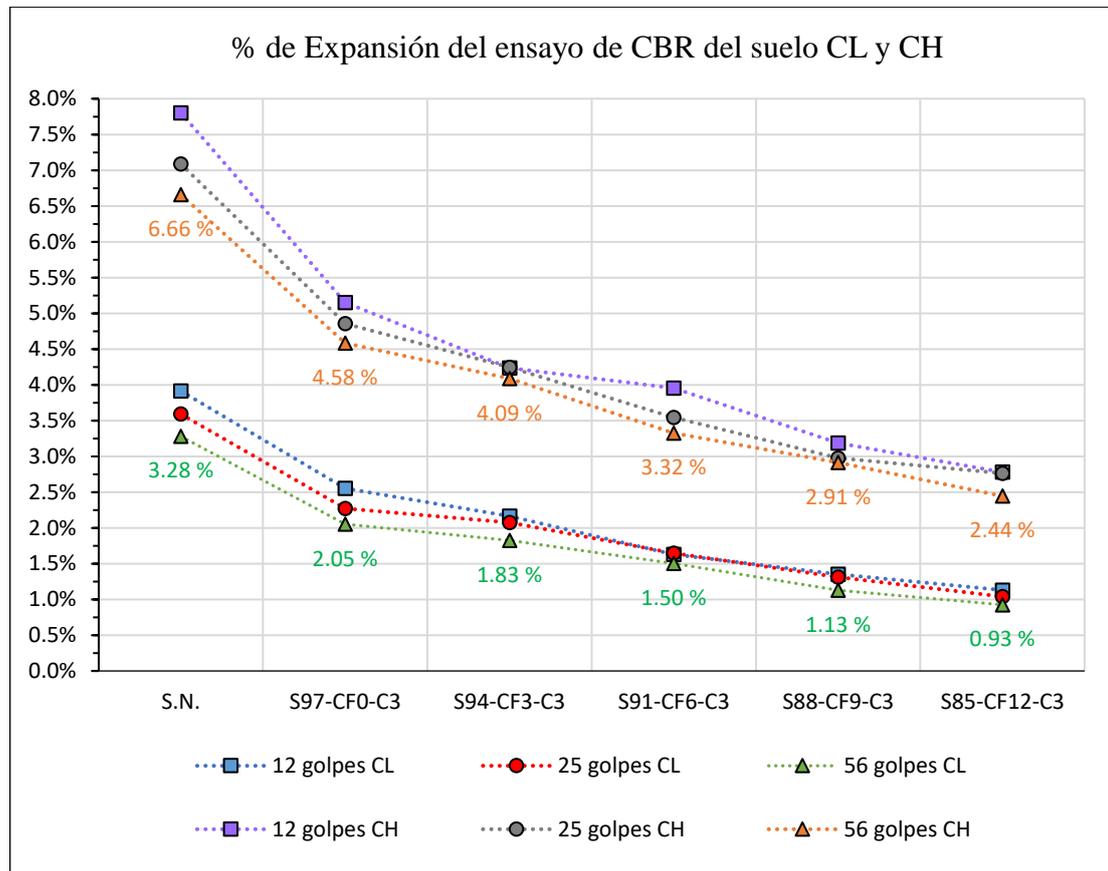
Nota: Elaboración propia.

Para ambos casos estudiados se evidencia que el grado de expansión varía significativamente entre el suelo natural y la primera dosificación propuesta S97-CF0-C3; sin embargo, a conforme aumenta los porcentajes de ceniza de fondo (derivado de

los hornos de ladrilleras) en las demás dosificaciones subsecuentes, la diferencia en los resultados se vuelve menos pronunciada. Esto sugiere que la cal desempeña un papel más efectivo en la mejora de esta propiedad comparado con la ceniza de fondo, lo que permite deducir que su acción es más eficiente en la reducción de este parámetro evaluado en la presente investigación. Así mismo, el grafico a continuación se observa que los aditivos empleados tienen un mejor rendimiento en el suelo tipo CL (arcilla arenosa de baja plasticidad) en comparación con el suelo tipo CH (arcilla arenosa de alta plasticidad).

Figura 43

Expansiones promedio en suelo CL y CH con ceniza de fondo y cal



Nota: Elaboración propia.



4.6. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE LAS DOSIFICACIONES

La evaluación económica de las diversas combinaciones analizadas para el mejoramiento del suelo de subrasante arcillosa, se hará exclusivamente con los insumos propuestos considerando las cantidades y pesos requeridos para un metro cubico (m³), este enfoque permitirá determinar el costo total por metro cubico, diferenciado para cada dosificación propuesta.

1. El costo de la ceniza de fondo en los hornos de ladrilleras en el centro poblado de Salcedo se cotizó en S/. 5.00 para un saco de 35 kilogramos aproximadamente, por lo tanto, el costo unitario por kilogramo es:

$$\frac{5}{35} = 0.14 \text{ soles/kg}$$

2. El costo de transporte de la ceniza de fondo desde el centro poblado de Salcedo hasta el camino vecinal Pallalla – Totojira se cotiza en: S/. 200.00 para 2 toneladas, por consiguiente, el costo unitario por kilogramo seria:

$$\frac{200}{2} = 100 \text{ soles/ton} \rightarrow \frac{100}{1000} = 0.10 \text{ soles/kg}$$

3. Luego tenemos el costo de ceniza fondo puesto en obra (camino vecinal Pallalla – Totojira):

$$(0.14 + 0.10) \text{ soles/kg} = 0.24 \text{ soles/kg}$$

4. Para el caso de la Cal ofrecido en tiendas PROMART se tiene la presentación de 20 kg a un precio de S/.17.90, de manera que el costo por kilogramo es:

$$\frac{17.90}{20} = 0.895 \text{ soles/kg}$$



5. También se tiene el costo comercial de la cal en presentaciones de Big Bag de 1/2 tonelada a un precio de S/.390

$$\frac{390}{500} = 0.78 \text{ soles/kg}$$

6. Finalmente, el costo del suelo a estabilizar es S/. 0 pues se encuentra en el mismo lugar de trabajo y no tiene costo alguno.

A continuación, se desarrolla el cálculo del peso de material para 1 m³ para todas las dosificaciones estudiadas en el presente trabajo de investigación:

Calicata C-02 (CL)

- S97-CF0-C3: Suelo Natural + 3% de cal

$$\text{Densidad seca} = 1.769 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{En } 1\text{m}^3 \text{ W} = 1769 \text{ kg}$$

- S94-CF3-C3: Suelo Natural + 3% de C.F. y 3% de cal

$$\text{Densidad seca} = 1.765 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{En } 1\text{m}^3 \text{ W} = 1765 \text{ kg}$$

- S91-CF6-C3: Suelo Natural + 6% de C.F. y 3% de cal

$$\text{Densidad seca} = 1.751 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{En } 1\text{m}^3 \text{ W} = 1751 \text{ kg}$$

- S88-CF9-C3: Suelo Natural + 9% de C.F. y 3% de cal

$$\text{Densidad seca} = 1.732 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{En } 1\text{m}^3 \text{ W} = 1732 \text{ kg}$$

- S85-CF12-C3: Suelo Natural + 12% de C.F. y 3% de cal

$$\text{Densidad seca} = 1.706 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{En } 1\text{m}^3 \text{ W} = 1706 \text{ kg}$$

Calicata C-03 (CH)

- S97-CF0-C3: Suelo Natural + 3% de cal

$$\text{Densidad seca} = 1.738 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow \text{En } 1\text{m}^3 \text{ W} = 1738 \text{ kg}$$

- S94-CF3-C3: Suelo Natural + 3% de C.F. y 3% de cal

Densidad seca = 1.730 gr/cm³ → En 1m³ W = 1730 kg

- S91-CF6-C3: Suelo Natural + 6% de C.F. y 3% de cal

Densidad seca = 1.708 gr/cm³ → En 1m³ W = 1708 kg

- S88-CF9-C3: Suelo Natural + 9% de C.F. y 3% de cal

Densidad seca = 1.693 gr/cm³ → En 1m³ W = 1693 kg

- S85-CF12-C3: Suelo Natural + 12% de C.F. y 3% de cal

Densidad seca = 1.667 gr/cm³ → En 1m³ W = 1667 kg

Una vez obtenido los pesos equivalentes para 1 m³ en todas las dosificaciones analizadas, se procede a estimar el precio unitario por metro cúbico, a continuación, se presentan las tablas correspondientes donde se efectúa dicho cálculo. Para el suelo CL los costos varían en un rango de S/. 41.39 (S.N.) hasta llegar a S/. 89.05 (S85-CF12-C3) y con respecto al suelo CH, de S/. 40.67 (S.N.) a S/. 87.02 (S85-CF12-C3).

Tabla 35

Costo estimado por m³ del suelo CL con ceniza de fondo y cal

Dosificación		Cantidad empleada x 1 m ³	Cantidad expresada en kg.	Costo unitario x kg.	Costo parcial	Costo total x 1 m ³
S97-CF0-C3	S.N.: 97%	0.97 m ³	1715.93	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 41.39
	C.F.: 0%	0.00 m ³	0	S/. 0.24	S/. 0.00	
	Cal: 3%	0.03 m ³	53.07	S/. 0.78	S/. 41.39	
S94-CF3-C3	S.N.: 94%	0.94 m ³	1659.1	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 54.01
	C.F.: 3%	0.03 m ³	52.95	S/. 0.24	S/. 12.71	
	Cal: 3%	0.03 m ³	52.95	S/. 0.78	S/. 41.30	
S91-CF6-C3	S.N.: 91%	0.91 m ³	1593.41	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 66.19
	C.F.: 6%	0.06 m ³	105.06	S/. 0.24	S/. 25.21	
	Cal: 3%	0.03 m ³	52.53	S/. 0.78	S/. 40.97	
S88-CF9-C3	S.N.: 88%	0.88 m ³	1524.16	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 77.94
	C.F.: 9%	0.09 m ³	155.88	S/. 0.24	S/. 37.41	
	Cal: 3%	0.03 m ³	51.96	S/. 0.78	S/. 40.53	
S85-CF12-C3	S.N.: 85%	0.85 m ³	1450.1	S/. 0.00	S/. 0.00	S/. 89.05
	C.F.: 12%	0.12 m ³	204.72	S/. 0.24	S/. 49.13	
	Cal: 3%	0.03 m ³	51.18	S/. 0.78	S/. 39.92	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 36

Costo estimado por m³ del suelo CH con ceniza de fondo y cal

Dosificación		Cantidad empleada x 1 m ³	Cantidad expresada en kg.	Costo unitario x kg.	Costo parcial	Costo total x 1 m ³
S97-CF0-C3	S.N.: 97%	0.97 m ³	1685.86	S/. 0.00	S/. 0.00	
	C.F.: 0%	0.00 m ³	0	S/. 0.24	S/. 0.00	S/. 40.67
	Cal: 3%	0.03 m ³	52.14	S/. 0.78	S/. 40.67	
S94-CF3-C3	S.N.: 94%	0.94 m ³	1626.2	S/. 0.00	S/. 0.00	
	C.F.: 3%	0.03 m ³	51.9	S/. 0.24	S/. 12.46	S/. 52.94
	Cal: 3%	0.03 m ³	51.9	S/. 0.78	S/. 40.48	
S91-CF6-C3	S.N.: 91%	0.91 m ³	1554.28	S/. 0.00	S/. 0.00	
	C.F.: 6%	0.06 m ³	102.48	S/. 0.24	S/. 24.60	S/. 64.56
	Cal: 3%	0.03 m ³	51.24	S/. 0.78	S/. 39.97	
S88-CF9-C3	S.N.: 88%	0.88 m ³	1489.84	S/. 0.00	S/. 0.00	
	C.F.: 9%	0.09 m ³	152.37	S/. 0.24	S/. 36.57	S/. 76.19
	Cal: 3%	0.03 m ³	50.79	S/. 0.78	S/. 39.62	
S85-CF12-C3	S.N.: 85%	0.85 m ³	1416.95	S/. 0.00	S/. 0.00	
	C.F.: 12%	0.12 m ³	200.04	S/. 0.24	S/. 48.01	S/. 87.02
	Cal: 3%	0.03 m ³	50.01	S/. 0.78	S/. 39.01	

Nota: Elaboración propia.

A continuación, se detalla el análisis de la relación costo-beneficio en el cual se compara los diferentes precios obtenidos para 1m³ según cada dosificación propuesta para los suelos de las calicatas C-02 (CL) y C-03 (CH), con el fin de evaluar cual es la opción que muestra una mayor eficacia.

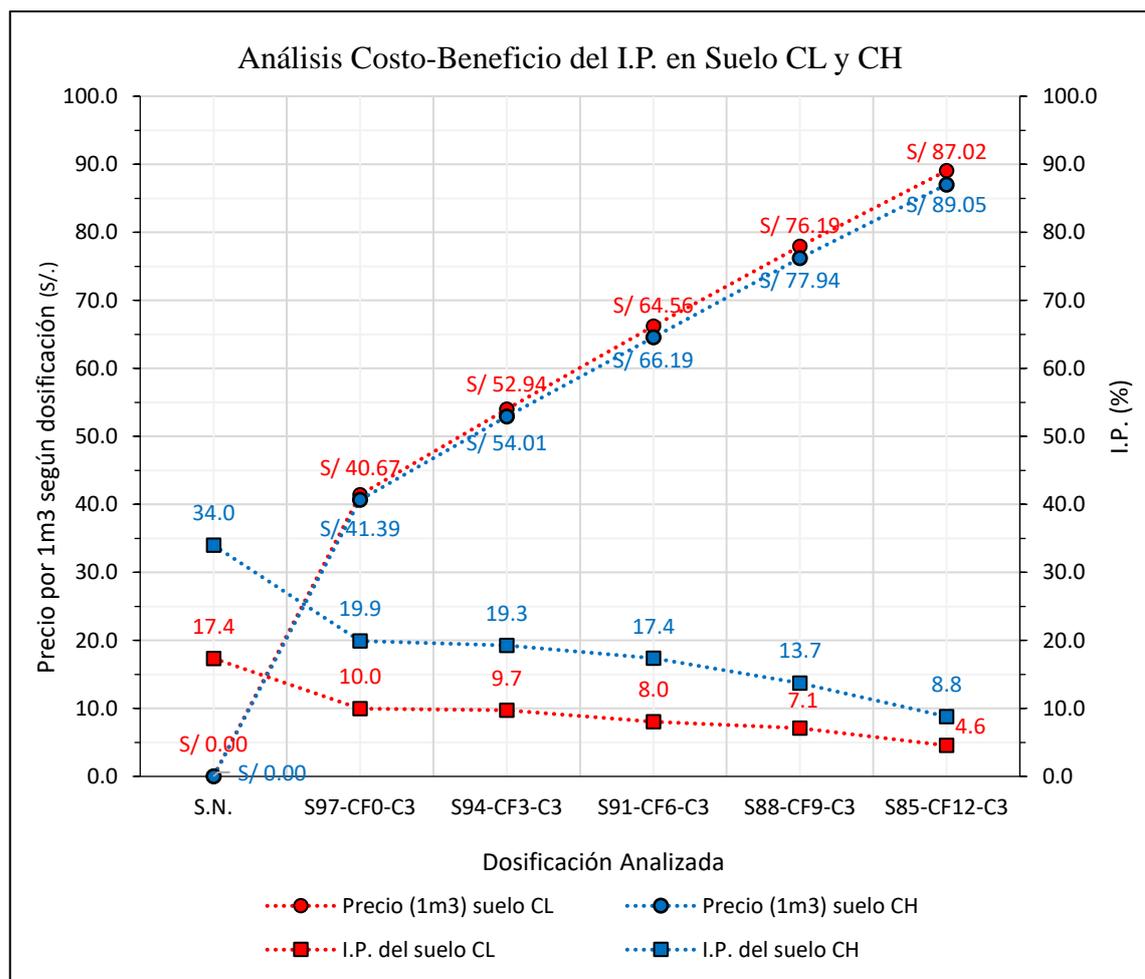
La siguiente figura muestra el análisis Costo-Beneficio del I.P. para el suelo CL y CH, en el eje vertical izquierdo, se muestra el precio por 1m³ para cada dosificación analizada (en soles S/.), mientras que en el eje vertical derecho se representa el Índice Plástico obtenido para cada mezcla. Por otro lado, en el eje horizontal se ordenan las distintas dosificaciones analizadas, que incluyen desde “S.N.” hasta “S85-CF12-C3”.

Se observa que para el suelo CL, el precio va aumentando desde S/. 0.00 en la primera dosificación hasta S/. 87.02 en la última, el I.P. disminuye de 17.4 a 4.6. Para el suelo CH, el precio se incrementa desde S/. 0.00 en la primera dosificación hasta S/. 89.05

en la última, del mismo modo que el anterior caso el I.P. se reduce de 34.0 a 8.8. Ambos tipos de suelo presentan una tendencia similar: se tiene que, a una mayor dosificación, el precio por metro cubico se incrementa mientras que el I.P. disminuye, también es importante resaltar el aumento considerable de precio con la adición de cal, precisamente en la dosificación S97-CF0-C3, donde también se evidencia una fuerte disminución del I.P. a comparación del resto de las dosificaciones donde solo ocurre incrementos de ceniza de fondo. Para esta parte podemos concluir que la dosificación óptima para ambos tipos de suelo es S85-CF12-C3.

Figura 44

Relación Costo-Beneficio para el I.P.



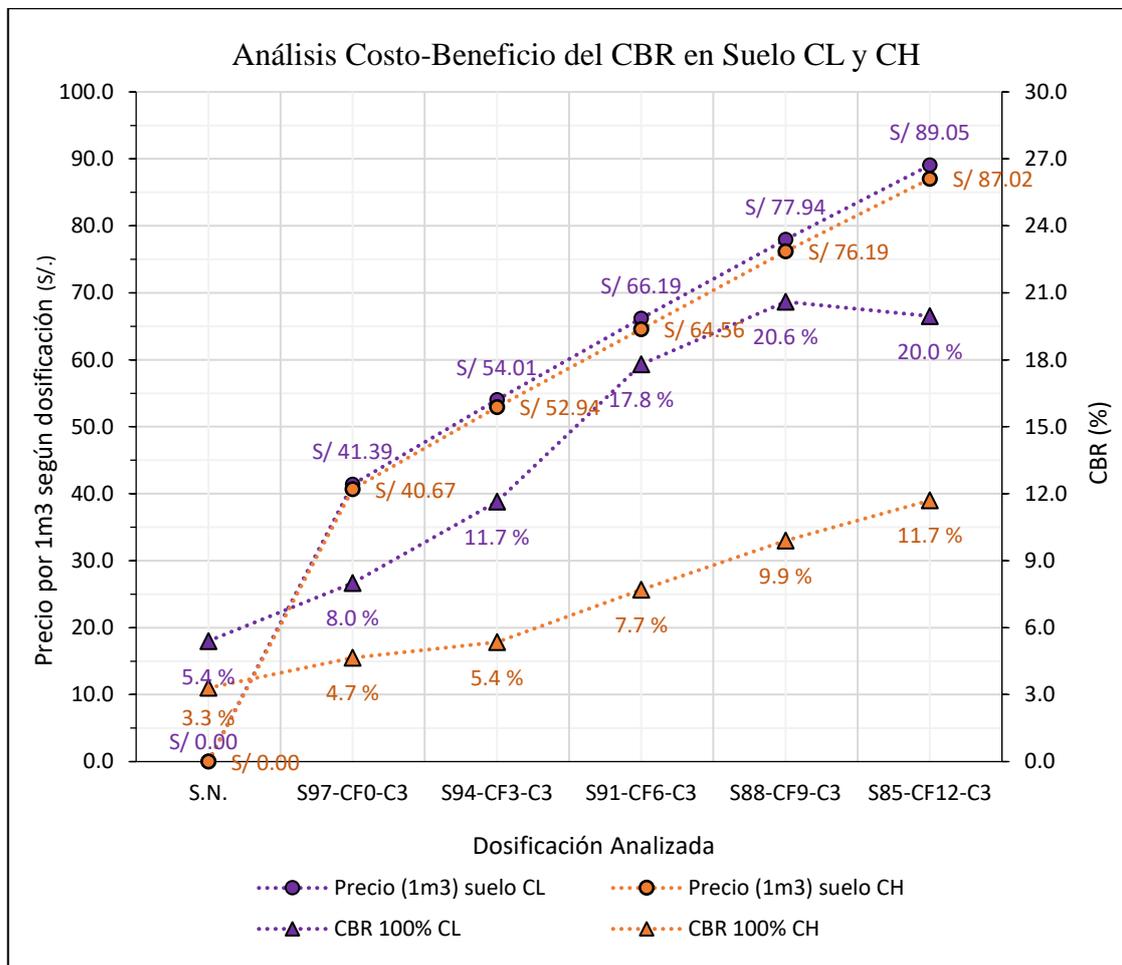
Nota: Elaboración propia



Con respecto a la capacidad de soporte del suelo, se tiene la gráfica a continuación en la cual se representa la relación entre el precio por un metro cubico según dosificación (en términos de soles) y el valor de CBR obtenido (en porcentaje). El eje vertical ubicado en la parte izquierda muestra el precio expresado en soles, el eje en sentido vertical del lado derecho, los valores del ensayo de CBR; y el eje horizontal (en la parte inferior) se encuentran las diferentes dosificaciones analizadas. Se evidencia que el precio por metro cubico aumenta para ambos suelos (CL y CH) conforme se incrementa la dosificación y son los mismos del anterior análisis costo-beneficio, para el suelo tipo CL el precio comienza en S/. 0.00 y sube hasta S/. 87.02 en la última dosificación, el CBR pasa de 5.4% a un máximo de 20.6% y para el caso del suelo CH, el precio sigue una tendencia similar, subiendo de S/. 0.00 hasta S/. 89.05, el CBR comienza en 3.3% y llega hasta un máximo de 11.7% en la última dosificación. La dosificación óptima para el suelo CL debería encontrarse alrededor de S88-CF9-C3, con un precio de S/. 77.94 y un CBR de 20.6% pues esto proporciona un buen balance entre el costo calculado y el aumento más significativo en la resistencia. Por otro lado, para el suelo CH la dosificación optima vendría a ser la última S85-CF12-C3 con un costo de S/. 87.02 y un CBR de 11.7% lo que la convierte en la mejor alternativa. Sin embargo, es importante señalar que, con los aditivos analizados en el presente estudio, el suelo CH presenta valores más bajos lo que lo hace menos eficiente en términos de costo-beneficio en comparación del suelo CL.

Figura 45

Relación Costo-Beneficio para el CBR



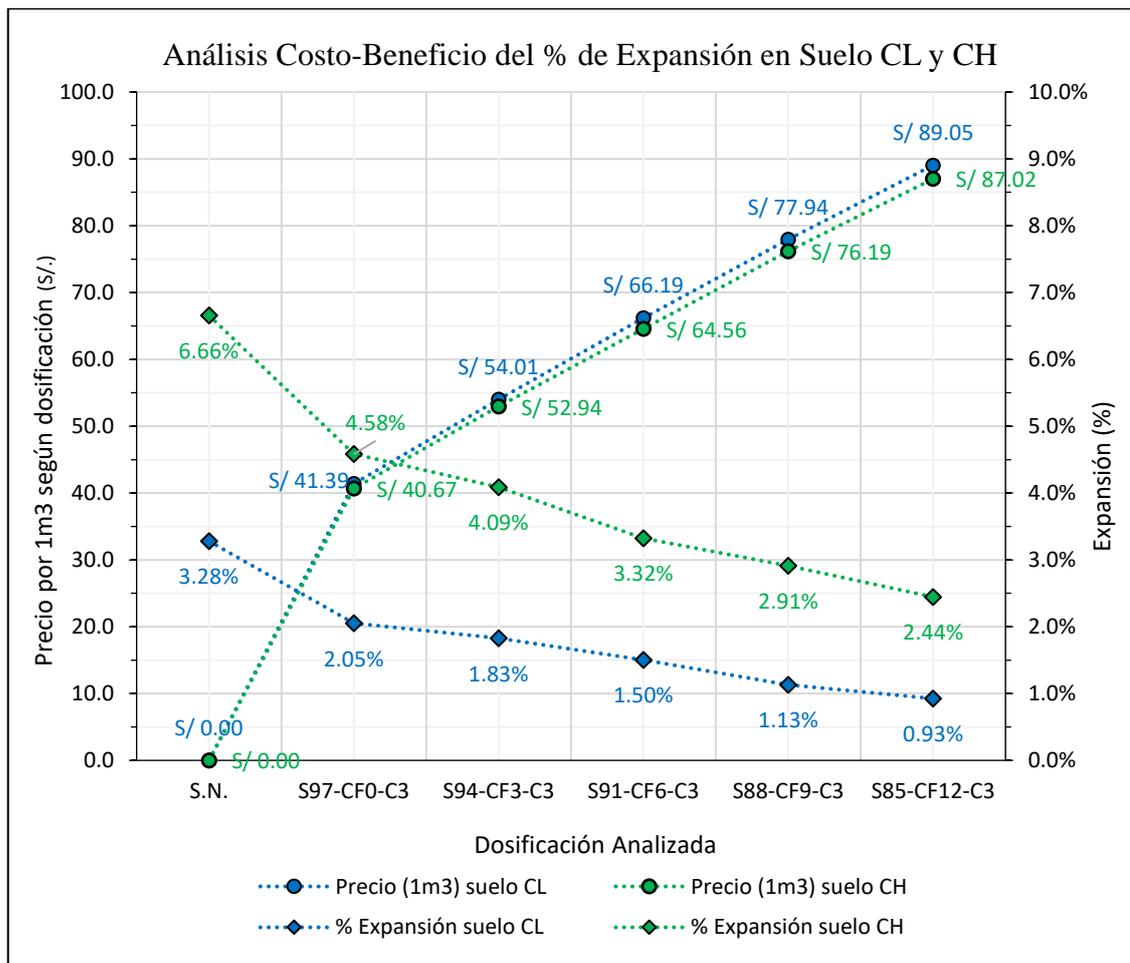
Nota: Elaboración propia

En relación a la expansividad de los suelos analizados se presenta el respectivo gráfico de la relación costo-beneficio, en el cual el eje vertical izquierdo se indica el precio en soles, en el eje vertical derecho el grado de expansión que experimentan cada suelo para cada mezcla y en el eje horizontal se indica las diferentes dosificaciones analizadas. Podemos observar que para ambos suelos (CL y CH) a medida que se incrementa el precio, por la incorporación de porcentajes de cal y ceniza de fondo, el grado de expansividad de los suelos tiende a disminuir. Para el suelo CL el precio aumenta de S/. 0.00 a S/. 89.05 logrando reducir el grado de expansión de 3.28% a 0.93% y para el suelo CH, ocurre una tendencia similar, el costo por un metro cubico analizado sube de S/. 0.00

a S/. 87.02 obteniendo una expansión de 6.66% a 2.44% para la última dosificación. Por lo tanto, la mezcla S85-CF12-C3 vendría a ser la dosificación óptima para ambos tipos de suelo estudiados, ya que es la opción más eficiente en relación al costo estimado y reducción del grado de expansión.

Figura 46

Relación Costo-Beneficio para el grado de expansión



Nota: Elaboración propia

Se determina que la dosificación óptima para el suelo CL es la mezcla SN + 9% de ceniza de fondo + 3% de cal y para el suelo CH, la mezcla SN + 12% de ceniza de fondo + 3% de cal.

4.7. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA CENIZA DE FONDO

La estructura molecular de la ceniza (obtenida de los hornos de ladrilleras del Centro Poblado de Salcedo) depende de los componentes quemados, para nuestro caso de estudio estas cenizas de fondo se componen principalmente de estiércol de ovino (comúnmente conocido como guano de ovejas), según el análisis químico realizado por el laboratorio de la facultad de Ing. Química, se determina que contiene un 52.78 % de SiO₂ en su composición, verificando su naturaleza como un material con características puzolánicas, es decir, posee la capacidad de reaccionar y así poder formar compuestos cementantes. Así mismo se observa que la ceniza de fondo está bastante contaminada con otros elementos, pero en menor medida, en la figura siguiente se muestra los resultados del análisis químico en realizado.

Figura 47

Análisis Químico de la ceniza de fondo

PARAMETROS QUIMICOS	UNIDAD	RESULTADOS
1.- Contenido de humedad	%	0.98
2.- Oxido de fosforo O ₁₀ P ₄	%	0.043
3.- Dióxido de azufre SO ₂	mg/kg	6061.12
4.- Óxido de hierro Fe ₂ O ₃	%	2.13
5- Oxido de potasio K ₂ O	%	0.002
6.- Trióxido de aluminio Al ₂ O ₃	%	6.25
7.- Oxido de calcio CaO	mg/kg	7482.32
8.- Oxido de magnesio MgO 9.-	mg/kg	98.15
9.- Oxido de silicio SiO ₂	%	52.78

Nota: Análisis químico realizado por el laboratorio de la facultad de Ing. Química, UNA Puno.

4.8. CONTRASTE DE HIPÓTESIS

4.8.1. Pruebas de normalidad

Mediante el empleo del programa SPSS se realiza el análisis de normalidad de los datos correspondientes a las variables categóricas y numéricas.

4.8.1.1. Datos de la variable categórica (ordinal):

- **Prueba estadística**

Se emplea Shapiro – Wilk (para muestras $n < 50$)

- **Hipótesis estadística**

H₀: Las dosificaciones estudiadas presentan normalidad.

H₁: Las dosificaciones estudiadas no presentan normalidad.

- **Principio de juicio**

Para el caso $p\text{-valor} < 0.050$ se procede a rechazar la H_0

Para el caso $p\text{-valor} \geq 0.050$ aceptamos la H_0 y por consiguiente rechazamos la H_1

- **Resultados y conclusión:**

Dado que el resultado de la significancia determinada, rechazamos la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la alternativa (H_1). Por consiguiente, se tiene que las dosificaciones analizadas, porcentajes de adición de ceniza de fondo y cal, no se ajustan a una distribución normal. La falta de normalidad sugiere que se debe aplicar métodos estadísticos no paramétricos para la prueba de hipótesis posterior.

Tabla 37

Prueba de normalidad de las dosificaciones (variable categórica)

Dosificaciones	Shapiro – Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Porcentajes de adición de ceniza de fondo y cal	0.929	12	0.000

Nota: Datos extraídos del programa SPSS.

4.8.1.2. Datos de la variable numérica (continua):

- ***Prueba estadística***

Se emplea Shapiro – Wilk (para muestras $n < 50$)

- ***Hipótesis estadística***

H₀: Los datos de los ensayos efectuados revelan normalidad.

H₁: Los datos de los ensayos efectuados no revelan normalidad.

- ***Principio de juicio***

Se tiene que $p\text{-valor} < 0.050$ rechazamos la H₀

Se tiene que $p\text{-valor} \geq 0.050$ aceptamos la H₀ y rechazamos H₁

- ***Resultados y conclusión:***

Para este caso el resultado de la significancia es superior, aceptamos H₀ y se procede a rechazar H₁. Entonces, como los porcentajes de adición de ceniza de fondo y cal no presentan una distribución normal se decide emplear una prueba de hipótesis estadística no paramétrica.

Tabla 38

Prueba de normalidad de los resultados de ensayos (variable numérica)

Resultados de ensayos realizados	Shapiro – Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
I.P.	0.883	12	0.096
M.D.S.	0.957	12	0.744
C.B.R.	0.892	12	0.124

Nota: Datos extraídos del programa SPSS.

4.8.2. Prueba de Hipótesis de Correlación para el I.P.

Para este caso se tiene:

- **Variable categórica:** Porcentajes de adición de ceniza de fondo y cal.
- **Variable numérica:** Resultados del índice de plasticidad.

- **Hipótesis estadística**

H₀: La adición de ceniza de fondo y cal no mejora las propiedades de plasticidad del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.

H₁: La adición de ceniza de fondo y cal mejora las propiedades de plasticidad del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.

- **Principio de juicio**

Cuando se presenta p-valor < 0.050 rechazamos H_0

Cuando se presenta p-valor ≥ 0.050 aceptamos H_0 y rechazamos H_1

- **Resultados y conclusión:**

Se realiza la prueba estadística y obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 39*Prueba de hipótesis para los resultados del I.P.*

Correlación	N	Coefficiente de correlación	Sig. (bilateral)
% adición de C.F. y Cal – resultados del I.P. en suelo arcilloso	12	-0.721	0.008

Nota: Datos extraídos del programa SPSS.

Después de aplicar la prueba estadística a los datos obtenidos, se calculó una significancia menor; por tanto, se procede a aceptar la hipótesis alternativa planteada “ H_1 : La adición de ceniza de fondo y cal mejora las propiedades de plasticidad del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.”. También se ha obtenido un coeficiente de -0.721 , esto implica una correlación negativa alta, el signo negativo del coeficiente refleja que, a medida que se incrementa los porcentajes de aditivos estabilizadores en los suelos arcillosos estudiados, decremantan los valores del I.P. La disminución de dichos valores se considera favorable para mejorar las propiedades de la subrasante.

4.8.3. Prueba de Hipótesis de Correlación para la M.D.S. y el O.C.H.

- **Variable categórica:** Porcentajes de adición de ceniza de fondo y cal
- **Variable numérica:** Resultados de los parámetros: máxima densidad y humedad optima.
- **Hipótesis estadística**

H_0 : La adición de ceniza de fondo y cal no influye en la máxima densidad seca (MDS) y al contenido de humedad óptimo (CHO) debido a la adición de insumos con características diferentes al suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.

H₁: La adición de ceniza de fondo y cal influye en la máxima densidad seca (MDS) y al contenido de humedad óptimo (CHO) debido a la adición de insumos con características diferentes al suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.

- **Principio de juicio**

Cuando se presenta p-valor < 0.050 rechazamos la H₀

Cuando se presenta p-valor >= 0.050 aceptamos H₀ y rechazamos H₁

- **Resultados y conclusión:**

Se realiza la prueba estadística y se tiene la siguiente tabla:

Tabla 40

Prueba de hipótesis para los resultados de la M.D.S. y O.C.H.

Correlación	N	Coefficiente de correlación	Sig. (bilateral)
% adición de C.F. y Cal – resultados de la M.D.S. en suelo arcilloso	12	-0.834	0.001
% adición de C.F. y Cal – resultados del O.C.H. en suelo arcilloso	12	0.742	0.031

Nota: Datos extraídos del programa SPSS.

Después de aplicar la prueba estadística a los datos obtenidos, se calculó una significancia menor a cinco centésimas manteniendo un nivel de confianza del 95% para ambos casos, por tanto, procedemos a aceptar la hipótesis alternativa “H₁: La adición de ceniza de fondo y cal influye en la máxima densidad seca (MDS) y al contenido de humedad óptimo (CHO) debido a la adición de insumos con características diferentes al suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.”.

También se tiene un coeficiente de -0.834 y 0.742 , esto implica una correlación positiva alta, el signo positivo del coeficiente refleja que, a medida que se incrementa los porcentajes de aditivos estabilizadores en los suelos arcillosos estudiados, disminuyen los valores de la M.D.S. y aumentan el O.C.H. respectivamente.

4.8.4. Prueba de Hipótesis de Correlación para el CBR

- **Variable categórica:** Porcentajes de adición de ceniza de fondo y cal
- **Variable numérica:** Resultados del CBR en suelo arcilloso.

- **Hipótesis estadística**

H₀: La adición de ceniza de fondo y cal no modifica positivamente la capacidad portante del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.

H₁: La adición de ceniza de fondo y cal modifica positivamente la capacidad portante del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira.

- **Principio de juicio**

En caso de $p\text{-valor} < 0.05$ desestimamos H_0

En caso de $p\text{-valor} \geq 0.05$ aprobamos H_0 y desestimamos H_1

- **Resultados y conclusión:**

Realizamos la prueba estadística y se tiene la siguiente tabla:

Tabla 41

Prueba de hipótesis para los resultados del CBR

Correlación	N	Coefficiente de correlación	Sig. (bilateral)
% adición de C.F. y Cal – resultados del CBR en suelo arcilloso	12	0.787	0.002

Nota: Datos extraídos del programa SPSS.

Después de aplicar la prueba estadística a los datos obtenidos, se obtuvo una significancia menor a cinco centésimas manteniendo una confianza del 95%. Se admite “H1: La adición de ceniza de fondo y cal modifica positivamente la capacidad portante del suelo arcilloso a nivel de subrasante del camino vecinal Pallalla – Totojira”. También se ha obtenido un coeficiente de 0.787, esto implica una correlación positiva alta, el signo positivo del coeficiente refleja que, a medida que se incrementa los porcentajes de aditivos estabilizadores en los suelos arcillosos estudiados, incrementan los valores del CBR. El aumento de dichos valores se considera favorable para mejorar las propiedades de la subrasante.

4.9. DISCUSIÓN CON ANTECEDENTES

Los resultados propios obtenidos evidencian con la incorporación de ceniza de fondo y cal a los suelos estudiados (con arcillas) ya sea de alta y baja plasticidad mejora sustancialmente sus propiedades, reduciendo el valor del índice de plasticidad, también influye en las propiedades de máxima densidad y humedad óptima, aumenta el CBR y baja la expansión del material. Dichos resultados coinciden con los reportados por Aguilar y Bravo (2020), quienes analizan dos tipos de suelos (CL y CH), con adiciones de ceniza de fondo logra bajar el I.P. hasta un valor de 14 para el suelo CL y 20.31 para el suelo CH, obteniendo resultados más favorables para el primer caso; con respecto a los



parámetros de compactación del ensayo de proctor modificado, para el suelo CL se llega a tener una M.D.S. de 1.680 g/cm³ con un O.C.H. de 19.54% y para el suelo tipo CH tiene una M.D.S. de 1.660 g/cm³ con un O.C.H. de 18.63%, dichos resultados son congruentes con la presente investigación; así mismo llega a tener valores de CBR de 52.89% y 70.83% esto debido a los altos porcentajes de adición de la ceniza de fondo llegando a agregar un 50% al suelo arcilloso.

En comparación con Choquecota (2022), quien obtuvo un I.P. de 8 al añadir 15% de ceniza de thola al suelo arcilloso tipo CL, dicho resultado es similar a nuestro caso de estudio donde se alcanzó 4.55 con una dosificación de SN + 12% de ceniza de fondo + 3% de cal; el autor también resalta el decremento de la M.D.S. y el aumento del O.C.H. a medida que se adiciona mayores porcentajes de ceniza de thola; en cuanto al CBR logra obtener un valor de 18.10% concluyendo que la mejor dosificación es con la adición de un 15% de ceniza de thola. En general los resultados son congruentes, ya que en ambos estudios emplean aditivos estabilizadores similares en suelos de la misma clasificación.

Por otro lado Delgado y Mormontoy (2021), con la adición de suelo natural (S.N.) más un 5% de cal de obra más un 3% de ceniza derivados de las mazorcas de maíz hallaron un I.P. de casi 0 transformando al suelo arcilloso en no plástico (N.P.), en nuestro caso de estudio con la dosificación SN + 3% cal + 12% de ceniza de fondo logramos tener un I.P. de 4.55, la diferencia de resultados se explica por la menor cantidad de cal adicionada; lo cual sugiere que mientras más porcentaje de cal se dosifique mayor será el decremento del I.P. en suelos arcillosos. En relación al CBR, se logra obtener un valor de 15.75 y una reducción de la expansión a 1.722% lo que indica que los resultados son congruentes.



Por su parte Huancoillo (2017) trabaja con material arcilloso de cantera, suelo tipo CL, logra obtener un I.P. de 4.13 para la dosificación SN + 25% de ceniza volante + 5% de cal, siendo este un valor similar al calculado en la presente investigación; del mismo modo el parámetro de compactación, M.D.S disminuye su valor pasando de 2.092 g/cm³ a 1.555 g/cm³ y el O.C.H aumenta de 10.45% a 20.90%, esto se atribuye al intercambio de material más liviano y con mayor capacidad de absorción como lo es la ceniza volante. Mas bien si existe diferencia con respecto al CBR, obteniendo valores por encima del 100% esto debido a que el material estudiado pertenece a una cantera y cuenta con mejores propiedades mecánicas. La expansión también se redujo de 1.67% a 0.74%.

Con respecto al estudio de Peralta (2023) analiza la incorporación de la ceniza derivados de los bagazos de caña de azúcar y cal de obra a arcillas tipo CL, con la mezcla SN + 20% de ceniza de caña de azúcar + 1% de cal consigue un I.P. de 7, lo cual es coherente con los resultados de la presente investigación; así mismo el autor indica que a medida que se agreguen mayores porcentajes de los aditivos estabilizadores ocurre una disminución de la M.D.S y un aumento significativo del O.C.H., en cuanto al CBR, el valor máximo alcanzado con solo cal fue de 22.12 en la dosificación SN + 11% de cal, sin embargo al emplear la mezcla SN + 15% de ceniza de caña de azúcar + 1% de cal se consigue un CBR superior de 24.62; se podría esperar que con las adiciones de mayores porcentajes de ambos aditivos generen el máximo CBR, se deduce que tanto en su estudio como en el nuestro, se observa la existencia de una dosificación óptima que permite alcanzar un CBR máximo, esta serían las cantidades de ceniza y cal que mezclados trabajen de la mejor forma.

Para los estudios realizados por Ayala et al. (2019) analizan un suelo arcilloso tipo CL, quienes se enfocan en los parámetros de la compactación y los resultados del CBR, los autores señalan que la M.D.S decremanta su valor hasta una adición del 20% de ceniza



de fondo pero luego incrementa dicho valor para porcentajes mayores al 20% de ceniza de fondo, en cuanto al O.C.H este siempre tiende a aumentar de forma constante; en nuestro estudio se analizó dosificaciones por debajo del 20% de adición de aditivos, por lo tanto no se pudo evidenciar una variación en la tendencia del valor de M.D.S.; con respecto al CBR los autores logran alcanzar hasta un máximo de 8.10% y bajar la expansión a 0.74%.

Mamani y Yataco (2017) analizan el comportamiento de la adición de ceniza de fondo en un suelo arcilloso tipo CL, reportando una reducción del I.P. de 59.34 a 17.87, en comparación con los resultados obtenidos, los datos son congruentes ya que, de manera similar, a medida que se va incrementando los porcentajes de ceniza de fondo el I.P. va reduciendo su valor. De manera paralela Berrospi y Paredes (2023) estudian la incidencia de agregar porcentajes de ceniza de retama en tres calicatas, en todos los casos logra bajar el I.P. agregando 12% de ceniza de retama; en cuanto al CBR alcanza su máximo valor agregando 8% de ceniza de fondo aduciendo que esta dosificación es la óptima para el suelo analizado. Se pudo observar que los resultados en estos estudios son consistentes con los hallados en la presente investigación, mostrando una relación clara entre la adición de las cenizas y los cambios positivos de las propiedades del suelo.

El estudio de Vargas (2020) evalúa la adición de ceniza volcánica logrando un I.P. de 8.39 agregando un 25% de ceniza en relación al peso del suelo; en esta investigación en particular existe diferencias en cuanto a los resultados de los parámetros de compactación, pues dicho autor indica que la M.D.S. se incrementa y el O.C.H. disminuye su valor a medida que se agrega más porcentaje de ceniza volcánica, esto puede explicarse a que dicho aditivo sería más pesado derivada de las diferencias en su temperatura de obtención. Además, el autor señala que el óptimo porcentaje de ceniza de volcán es 20% pues con esta dosificación se logra el máximo CBR que es de 11.75% y llega a una



expansividad de 0.4%. Por otro lado, Vilcas de la Cruz (2022) emplea ceniza de ladrillos en un suelo tipo SC, señalando que adicionando un 20% de ceniza de ladrillo se obtiene un I.P. de 14.37. Comparado con el caso anterior este autor obtiene resultados más favorables con respecto a la evaluación del CBR, pues con la misma dosificación alcanza un máximo valor de 22.87%. Estos hallazgos concuerdan con el presente estudio.

En relación al autor Aquepucho y Cristobal (2024) se analiza 3 calicatas todos de suelo arcilloso, para los 3 casos logra bajar el I.P. a valores de 15.75, 15.87 y 14.89 con una adición de 16% de ceniza de cascara de café, así mismo indica que el incremento del CBR es de 13.96%, 14.59% y 14.55%, se observa que el CBR obtenido por estos autores es ligeramente inferior al de nuestro estudio para un suelo tipo CL lo cual puede atribuirse a que el suelo analizado presenta una mayor porcentaje de suelos finos (material pasante del tamiz #200), con respecto a la expansión, esta si mejora a 0.5% convirtiendo el material en adecuado para la trocha carrozable en estudio. Por tanto, estos resultados si guardan relación.

Moale y Rivera (2019) señalan que con una adición de 15% de cal al suelo natural, el CBR incremento su valor en un 78.8%, esto se traduce en 5.9%, además indica que la M.D.S. aumenta conforme se incrementa los porcentajes de cal, la diferencia en los resultados con respecto a la presente investigación puede explicarse por la mayor gravedad específica de la cal empleada por los autores. Por su parte Mamani et al. (2023) evaluaron la influencia de la ceniza de quinua combinada con un cierto porcentaje constante de cal en una subrasante arcillosa, señalan que para una proporción de SN + 9% de ceniza de quinua + 5% de cal obtienen una reducción del I.P. a 9.16, lo que coincide con los resultados de la presente investigación. En cuanto al ensayo de CBR se obtuvo un valor máximo de 32%, resultado que se atribuye al empleo de un mayor porcentaje de



cal, estos resultados demuestran una clara consistencia comparado con los hallazgos de la presente investigación.

En comparación con Aref et al. (2016) señalan que la combinación de un 20% de puzolana natural y un 8% de cal mostró un mayor efecto en la reducción del I.P., este disminuyó de 28.8% a 2.87%, además concluye que la adición de cal por si sola aumenta el O.C.H. y disminuye el valor de M.D.S. se observa claramente un comportamiento similar a los resultados con el suelo arcilloso tipo CL. Así mismo Harikaran et al. (2023) indica un aumento del CBR de acuerdo con las reacciones químicas que ocurren a medida que se adiciona mayores porcentajes de compuesto de polvo de cascara de huevo en las partículas del suelo arcilloso, indica que con una mezcla de SN + 9% de cal + 12% de cascara de huevo se logra obtener un CBR de 30%. Prosiguiendo Kumar (2013) analiza diferentes proporciones de cal y polvo de cantera, en base a los resultados del ensayo de CBR, concluye que el porcentaje óptimo de cal es de 4%, pues este combinado con diferentes porcentajes de polvo de cantera es más efectivo, para nuestro caso se analizó con una proporción constante de cal de 3% optando por el criterio del pH.

Según Ünsever y Lamine (2019) indica que al agregar 2% de cal y ceniza volante a la arcilla se evidencia una ligera disminución en el L.L. y una clara disminución del I.P. en cambio el L.P. experimentó un aumento de su valor. Se consiguió bajar el I.P. de 22.70 a 3.82 con la adición de 2% de cal + 15% de ceniza volante, así mismo el estudio detalla que si se agrega más ceniza este pierde completamente la propiedad de plasticidad, procede a convertirse en un material que no es plástico (N.P.), estos resultados son congruentes con los hallados en la presente investigación, pues del mismo modo, conforme se incorpora ceniza de fondo y cal de obra en arcillas ocurre una disminución progresiva en el valor del I.P., en cuanto a los parámetros de compactación, dicho autores señalan que añadiendo 2% de cal + 30% de ceniza volante a la arcilla este parámetro



decrementa de 1.530 t/m³ a 1.420 t/m³, para O.C.H., este se incrementa hasta 26% y luego tiende a bajar con mayores porcentajes de ceniza volante.

Harichane, et al. (2011) realizaron un estudio comparativo entre dos tipos de arcillas, la primera de tipo CL y la segunda de tipo CH; para ambos tipos de suelo logra reducir el I.P. mediante la adición de combinaciones de puzolana natural y cal; con respecto a los parámetros de compactación los autores concluyen que la M.D.S decrementa ligeramente su valor y el O.C.H aumenta conforme se incrementa la proporción de los aditivo mencionados, En base a estos datos obtenidos se puede afirmar que el comportamiento de los suelos analizados es congruente con los hallazgos de la presente investigación. En comparación con Hameed y Kamel (2018) concluye de manera similar pues en este caso al agregar cenizas de aserrín a suelos arcillosos la M.D.S decrementa su valor, pasando de 16.87 kN/m³ a 13.9 kN/m³ mientras que el O.C.H. tiende a aumentar subiendo de 18.5% a 23.61% esto se explica porque el insumo adicionado es más ligero y tiene una mayor capacidad de absorción.

Por otro lado, Pushpakumara y Mendis (2022) indica que con el aumento en el porcentaje de cenizas derivadas de cascaras de arroz de 0.0% a 30.0%, se tiene que el I.P. disminuye su valor hasta el primer incremento del 5% y luego aumentó con ligeras fluctuaciones para los tres contenidos de cal. El I.P. mínimo se obtiene para un 5% de ceniza de cascas de arroz + 10% de cal siendo 16.6m mostrando una reducción del 49.7%. la reducción inicial del I.P. podría atribuirse a la reducción inicial en el L.L. y al incremento en el L.P. debido a factores que son de menos afinidad por el agua, causada por el reemplazo de minerales arcillosos con aglutinantes y el aumento de la floculación causada por el intercambio catiónico en la mezcla de ceniza de cascara de arroz con cal. Así mismo los autores señalan que ocurre una reducción de la M.D.S. con la inclusión de la cenizas derivadas de cascaras de arroz independientemente de la cal, pues dicho aditivo



tiene una gravedad específica de 1.95 en comparación con la del suelo arcilloso (S.N.) que tiene una gravedad específica de 2.59, con respecto al O.C.H. se evidencia en un aumento, esto se deba posiblemente a la inclusión de dichos aditivos, pues causa una mayor cantidad de sílice y alúmina, lo que se traduce en la necesidad de más agua para que ocurra la reacción puzolánica.



V. CONCLUSIONES

- PRIMERA:** La incorporación de ceniza de fondo y cal, en diferentes dosificaciones, si influye de forma positiva para el mejoramiento de la subrasante arcillosa, del camino vecinal Pallalla – Totojira.
- SEGUNDA:** Para la calicata C-02 (CL) el suelo natural presenta un I.P. inicial de 17.35% clasificándose como un suelo de plasticidad media, con la dosificación S85-CF12-C3 el I.P. disminuye a 4.55% transformándose en un suelo de plasticidad baja. Para el caso de la calicata C-03 (CH) el suelo natural presenta un I.P. de 33.99%, suelo de plasticidad alta, con la mezcla S85-CF12-C3 el I.P. llega a tener un valor de 8.80% cambiando a suelo de plasticidad media. Se observa que los índices de plasticidad experimentan mejoras con la adición de ceniza de fondo y cal por lo que se puede afirmar que se ha mejorado este parámetro.
- TERCERA:** La inclusión de ceniza de fondo y cal de obra si incide en la propiedad de máxima densidad seca para los suelos analizados, para la muestra de la calicata C-02 (CL) se observa una disminución de este parámetro, el suelo natural, obtiene un resultado de 1.777 gr/cm³ y con respecto a la última dosificación S85-CF12-C3 se reduce a 1.706 gr/cm³. Para las muestras analizadas de la calicata C-03 (CH) también se observa una disminución de dicho parámetro, con respecto al suelo natural (suelo patrón) se registra un resultado de 1.753 gr/cm³ y para la última dosificación S85-CF12-C3 se disminuye a 1.667 gr/cm³. En ambos casos se evidencia un decremento de la MDS en concordancia con el aumento de las proporciones de ceniza de fondo y cal, esto se explica principalmente a la naturaleza liviana de la



ceniza de fondo que se encuentra en forma de polvo fino. En relación al contenido de humedad óptimo la inclusión de ceniza de fondo con la cal si afecta en el valor de dicho parámetro, para la calicata C-02 (CL) se tiene para el suelo natural un CHO de 14.95% y con la dosificación S85-CF12-C3 llega a un valor de 17.35%, en referencia a la calicata C-03 (CH) se constata un mayor incremento del CHO pasando de 16.90% para el suelo natural hasta 20.31% para la dosificación S85-CF12-C3. Se puede notar que en ambos escenarios ocurre un aumento del CHO conforme se adiciona mayor cantidad de ceniza de fondo y cal, esto es atribuible principalmente a la mayor capacidad de absorción de humedad de la ceniza de fondo.

CUARTA: Para el CBR, en la calicata C-02 (CL) se observa un aumento significativo del CBR al 95% pasando de 3.7% (suelo natural) a 17.6% (dosificación S85-CF12-C3) y para el CBR al 100% se incrementa de 5.4% (suelo natural) a un máximo de 20.6% (dosificación S88-CF9-C3), en ambos casos el suelo arcilloso pasa de ser categorizado como subrasante pobre a subrasante buena y muy buena. En el caso de calicata C-03 (CH), se observa un menor incremento de CBR con respecto al caso anterior, pues el CBR al 95% pasa de 2.3% (suelo natural) a 10.0% (dosificación S85-CF12-C3), así mismo el CBR al 100% experimenta un incremento de 3.5% (suelo natural) a 11.7% (dosificación S85-CF12-C3), en ambas situaciones el suelo arcilloso pasa de categorizarse como subrasante inadecuada a subrasante buena. Por lo tanto, se mejora los parámetros de CBR adicionando ceniza de fondo y cal. Con respecto al porcentaje de expansión se determina para la calicata C-02 (CL) una disminución de



3.28% (suelo natural) a 0.93% (dosificación S85-CF12-C3) y para la calicata C-03 (CH) también se observa un decremento de este parámetro descendiendo de 6.66% (suelo natural) a 2.44% (dosificación S85-CF12-C3). En consecuencia, las dosificaciones analizadas mejoran significativamente este parámetro.

QUINTA: Así mismo, en virtud al análisis de la relación costo-beneficio de la adición de ceniza de fondo y cal para la subrasante arcillosa del camino vecinal objeto de estudio, se determina que la dosificación óptima para el suelo CL es la mezcla SN + 9% de ceniza de fondo + 3% de cal y para el suelo CH, la mezcla SN + 12% de ceniza de fondo + 3% de cal.



VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Se recomienda el empleo de la ceniza de fondo y cal como aditivos estabilizadores para el mejoramiento de subrasantes arcillosas de clasificación CL, además que esta alternativa promueve un diseño y construcción más amigables con el medio ambiente gracias a la gestión adecuada de residuos.
- SEGUNDA:** Para los casos que se tenga suelos de clasificación CH se sugiere llevar a cabo investigaciones con otras proporciones de ceniza de fondo para conocer a más detalle el comportamiento de los parámetros de Índice de Plasticidad (I.P.), Índice de Capacidad Portante (CBR) y el porcentaje de expansión.
- TERCERA:** Se sugiere a los productores de ladrillos del centro poblado de Salcedo a implementar una adecuada disposición de las cenizas fondo (producidos en sus hornos), debido a su potencial como aditivo estabilizador de suelos arcillosos.
- CUARTA:** A futuros investigadores se recomienda profundizar en estudios adicionales la aplicación de otros aditivos alternativos a los convencionales que logren mejorar las propiedades físicas y mecánicas en suelos de subrasantes arcillosas.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi, Y., Babazadeh, R., & Ghobadi, M. (2013). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 611-619. doi:10.1007/s10064-013-0563-7
- Aguilar Paravicino, H. O., & Bravo Gutierréz, J. C. (2020). *Evaluación de la ceniza de fondo para la estabilización de suelos arcillosos provenientes de la zona ladrillera del distrito de San Jerónimo - Cusco*. [Tesis de pregrado] Universidad Andina del Cusco. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12557/3605>
- Altamirano Navarro, G. J., & Díaz Sandino, A. (2015). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí- Rivas*. [Tesis de pregrado] Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. Obtenido de <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/6456>
- Amakye, S., & Abbey, S. (2021). Understanding the Performance of Expansive Subgrade Materials Treated with Non-traditional Stabilisers. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 16.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100159>
- Aquepucho Cervantes, E., & Cristobal Villanueva, J. F. (2024). *Incorporación de ceniza de cáscara de café en las propiedades de los suelos arcillosos para trochas carrozables Arequipa 2023*. [Tesis de pregrado] Universidad Cesar Vallejo, Arequipa. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/138605>
- Aref, a.-S., Ibrahim, H., & Ayman, M. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12. doi:10.1007/s41062-021-00544-7
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM.
- ASTM. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM.
- Ayala, G., Rosadio, A., & Durán, G. (2019). Estudio del efecto de adición de ceniza proveniente de ladrilleras artesanales en la estabilización de suelos arcillosos



para pavimentos. *Conference: The 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities"*, Jamaica.
doi:10.18687/LACCEI2019.1.1.115

- Barman, D., & Kumar, S. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1319-1342. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>
- Berrosپی Herrera, R. G., & Paredes Meza, G. M. (2023). *Estabilización de subrasante para suelos arcillosos utilizando porcentajes parciales de ceniza de retama en la vía vecinal LM 634 empalme LM 635 al centro poblado de Lampian - Huaral, Lima - 2022*. [Tesis de pregrado] Universidad Privada del Norte, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/34282>
- Braja M., D. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. (4ta ed.). CENGAGE Learning.
- Chang, A. C., Lund, J. L., Page, L. A., & Warneke, E. (2016). *Improvement in Bearing Capacity of a Soft Soil by Addition of Fly Ash* (Vols. 143, pp. 498-505). *Procedia Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.063>
- Chirinos Quispe, J. C. (2016). *Efecto de la Energía de Compactación en la Densidad Seca Máxima y Contenido Óptimo de Humedad del Suelo Granular de la Cantera El Gavilán*. [Tesis de pregrado] Universidad Privada del Norte.
- Choquecota Serrano, W. (2022). *Incorporación de ceniza de thola para estabilizar el suelo de subrasante de una trocha carrozable, Chucuito Puno, 2022*. [Tesis de pregrado] Universidad César Vallejo, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/96383>
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. (5ta ed.) Limusa.
- Cubas Benavides, K., & Falen Chavez, J. (2016). *Evaluación de las cenizas de carbón para la estabilización de suelos mediante activación alcalina y aplicación en carreteras no pavimentadas*. [Tesis de pregrado] Universidad Señor de Sipán, Pimentel. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12802/3134>



- Delgado Rivera, C., & Mormontoy Peñalba, V. (2021). *Estabilización de suelos arcillosos con adición de ceniza de mazorca de maíz y cal*. [Tesis de pregrado] Universidad Andina del Cusco. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12557/4587>
- Guerrero Gómez, G., Espinel Blanco, E., & Sánchez Acevedo, H. (2017). *Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales* (Vol. 21). [Artículo de investigación] Bogota - Colombia. doi:<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a09>
- Hameed Karim, H., & Kamel Mohsen, M. (2018). Stabilization of soft clayey soils with sawdust ashes. *MATEC Web of Conferences*, 8. doi:[10.1051/mateconf/201816201006](https://doi.org/10.1051/mateconf/201816201006)
- Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., & Grine, K. (2011). Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 12. doi:[10.1007/s10706-011-9415-z](https://doi.org/10.1007/s10706-011-9415-z)
- Harikaran, M., Kulanthaivel, P., & Vinodhkumar, S. (2023). Eco-friendly soil stabilization: a combined approach using lime and waste eggshell powder. *Global NEST Journal*, 11. doi:<https://doi.org/10.30955/gnj.005077>
- Hernández Rosales, M. (2006). *Estudio geológico y reconomiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, estado de Aragua*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6ta ed.) McGRAW-HILL/INTERAMERICANA. Obtenido de <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Huancoillo Humpiri, Y. J. (2017). *Mejoramiento de suelo arcilloso con ceniza volante y cal para su uso como pavimento a nivel de afirmado en la carretera desvío Huancané – Chupa – Puno*. [Tesis de pregrado] Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6963>



- Kumar Sabat, A. (2013). Prediction of california bearing ratio of a soil stabilized with lime and quarry dust using artificial neural network. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/289589380_Prediction_of_california_bearing_ratio_of_a_soil_stabilized_with_lime_and_quarry_dust_using_artificial_neural_network
- Ley N°26842. (1997). Ley general de salud del Perú. Decreto de 1997 en Diario oficial El Peruano.
- Livise Berrio, J. V. (2023). *Estabilización química de suelo con cal para el mejoramiento de sub base del tramo KM 08+000 al 10+000 de la carretera Puno – Mañazo*. [Tesis de pregrado] Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Obtenido de www.repositoriounapuno.com
- Luján, M., & Guzmán, D. (2015). Diseño, Construcción y Evaluación de un Horno para la Cocción de Ladrillos Artesanales. *RevActaNova*, 7(2), 165-193. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892015000200006
- Machado, L. F., Cavalcante, E. H., Albuquerque, F. S., & Sales, A. T. (2017). *Adición de una asociación polimérica a un arcilloso-arenoso-limosotierracon el objetivo de alcanzar la estabilización química para su uso como materiales de pavimento*. Rio de Janeiro: Revista Materia. doi:10.1590/S1517-707620170003.0204
- Mamani Barriga, L. E., & Yataco Quispe, A. J. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho*. [Tesis de pregrado] Universidad San Martín de Porres, Lima.
- Mamani Gonzalo, G., De la Cruz Vega, S. A., Vega Neyra, C. S., Yllescas Rodriguez, P. M., & Rea Olivares, W. M. (2023). *Estabilización de la subrasante con ceniza de quinua y cal en la Carretera Lago Sagrado, Puno, Perú*. [Artículo científico], Lima. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.15517/iv.v25i44.53569>



- Moale Quispe, A., & Rivera Justo, E. (2019). *Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica*. [Tesis de pregrado] Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/648846>
- MTC. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (Sección suelos y pavimentos)*. Lima. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf
- MTC. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima. Obtenido de https://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/document
- Nadal, J. (2006). *El suelo estabilizado, material de construcción*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Peralta Tingal, S. (2023). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de bagazo de caña de azúcar*. [Tesis de pregrado] Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Porras Días, H., & Sánchez Rivera, O. G. (2015). *Apuntes de Estadística Aplicada a Ingeniería Civil*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- PRODUCE. (2010). *Guía de la buenas prácticas para ladrilleras artesanales*. Obtenido de <http://spij.minjus.gob.pe/graficos/Peru/2010/abril/21/RM-102-2010-PRODUCE.pdf>
- Pushpakumara, B., & Mendis, W. (2022). Suitability of Rice Husk Ash (RHA) with lime as a soil stabilizer in geotechnical applications. *International Journal of Geo-Engineering*, 12. doi:<https://doi.org/10.1186/s40703-021-00169-w>
- Swisscontac. (2012). *Programa Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina para Mitigar el Cambio Climático (EELA)*. Lima, Perú: Calandria.
- Ünsever, Y. S., & Lamine Diallo, M. (2019). Stabilization of Clay Soils Using Fly Ash. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8. doi:[10.34248/bsengineering.564166](https://doi.org/10.34248/bsengineering.564166)



- Vargas Gonza, B. (2020). *Estabilización de un suelo arcilloso con ceniza volcánica para el mejoramiento de subrasante en la progresiva km 5+100 al 6+100 del tramo Asirumi – Rosaspata Huancané*. [Tesis de pregrado] Universidad Peruana Unión, Juliaca. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12840/3487>
- Vilcas de la Cruz, E. (2022). *Estabilización de Suelos Arcillosos Adicionando Ceniza de Ladrillo en Vías no Pavimentadas*. [Tesis de pregrado] Universidad Peruana de los Andes, Huancayo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12848/3578>
- Villanueva Meza, C. D. (2023). *Evaluación de la ceniza de carbón como aditivo estabilizador en suelos arcillosos con fines de pavimentación*. [Tesis de pregrado] Universidad Señor de Sipán, Pimentel. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12802/10490>



ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de consistencia

ANEXO 2: Cuadro de operacionalización de variables

ANEXO 3: Panel de fotográfico

ANEXO 4: Resultados de ensayos de laboratorio

ANEXO 5: Constancia de uso de equipos de laboratorio

ANEXO 6: Solicitud para autorización de calicatas

ANEXO 7: Especificaciones de cal de obra

ANEXO 8: Análisis químico de la ceniza de fondo



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo AMÉRICO COLQUE ATENCIO,
identificado con DNI 75396205 en mi condición de egresado de:

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

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" EVALUACION DEL USO DE CENIZA DE FONDO Y CAL COMO ADITIVO
ESTABILIZANTE DE SUELO ARCILLOSO EN LA SUBRASANTE DEL CAMINO
VECINAL PALLALLA - TOTUJIRA "

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 23 de OCTUBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



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

Por el presente documento, Yo AMERICO COLQUE ATENCIO
identificado con DNI 75396209 en mi condición de egresado de:

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

INGENIERIA CIVIL

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

“ EVALUACION DEL USO DE CENIZA DE FONDO Y CAL COMO ADITIVO ESTABILIZANTE DE SUELO ARCILLOSO EN LA SUBRASANTE DEL CAMINO VECINAL PALLALLA - FOTAJIRA. ”

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 23 de OCTUBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella