

**Influencia de las cenizas volcánicas en la estabilización de arcillas
expansivas para uso como subrasante en el distrito La Victoria-
Chiclayo**

PRESENTADA POR
Denilso Rivera Guerrero

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Mario Antonio Martínez Fiestas
PRESIDENTE

Lucas Ludeña Gutiérrez
SECRETARIO

Angel Alberto Lorren Palomino
VOCAL

Dedicatoria

Con todo mi cariño y agradecimiento, quiero dedicar este trabajo a mi familia, que siempre ha sido mi mayor fuente de apoyo y el motor de mi éxito. Gracias a mis padres, Yovani Guerrero y Tomás Rivera, por su amor inquebrantable, por todos sus sacrificios por mí y por ser para mí un ejemplo de trabajo duro y determinación. A mi hermana, que siempre me ha apoyado. También está dedicado a todos los que me ayudaron a perseverar cuando más lo necesitaba, ya sea con una palabra de apoyo, una discusión o simplemente con su presencia. Ellos también son los dueños de este logro.

Agradecimientos

Ante todo, quiero dar gracias a Dios por haberme dado la salud, el valor y el discernimiento que necesitaba para terminar esta importante fase de mi estudio. Quiero expresar mi gratitud a mi familia por ser mi principal fuente de ánimo y apoyo durante este viaje. Incluso en momentos de incertidumbre, su fe en mí ha sido esencial para nuestro progreso.

Agradezco a la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (USAT) el haberme ofrecido una formación completa que me ha ayudado enormemente en mi crecimiento profesional y personal. Gracias al Ing. Lorren Palomino Ángel Alberto, directora de la tesis, por sus acertados consejos, tolerancia y aportaciones que han enriquecido este trabajo. Por último, quiero expresar mi gratitud a mis amigos y compañeros de clase por su compañía, colaboración y los momentos compartidos durante esta aventura académica.

Influencia de las cenizas volcánicas en la estabilización de arcillas expansivas para uso como subrasante en el distrito La Victoria-Chiclayo

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	13%	4%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	5%
2	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.uandina.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1%
6	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.usmp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1%
10	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1%

Índice

RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN.....	16
REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	20
BASES TEÓRICO-CIENTÍFICAS	25
MATERIALES Y MÉTODOS	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	85
CONCLUSIONES	152
RECOMENDACIONES	153
REFERENCIAS	154
ANEXOS	157

Lista de tablas

TABLA I. CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN ÍNDICE DE PLASTICIDAD	29
TABLA II. CATEGORÍAS DE SUBRASANTE	31
TABLA III. REQUISITOS QUÍMICOS	34
TABLA IV. FACTOR “K” PARA EL LÍMITE LÍQUIDO	38
TABLA V. CRITERIO PARA SELECCIONAR LA CANTIDAD DE CALICATAS Y PROFUNDIDAD	47
TABLA VI. CRITERIO DE SELECCIÓN DE PORCENTAJES	48
TABLA VII. ENSAYOS PARA SUELO EN ESTADO NATURAL	50
TABLA VIII. NÚMERO DE ENSAYOS PARA C-1	51
TABLA IX. NÚMERO DE ENSAYOS PARA C-2	51
TABLA X. NÚMERO DE ENSAYOS PARA C-3	52
TABLA XI. ENSAYO DEL DCP CON EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS	52
TABLA XII. VARIABLE DEPENDIENTE	53
TABLA XIII. VARIABLE DEPENDIENTE	54
TABLA XIV. VARIABLE INTERVINIENTE.....	56
TABLA XV. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	56
TABLA XVI. INSTRUMENTOS.....	56
TABLA XVII. PORCENTAJES DE ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA.....	78
TABLA XVIII. CANTIDAD DE CV PARA LÍMITES DE ATTERBERG C-01	79
TABLA XIX. CANTIDAD DE CV PARA LÍMITES DE ATTERBERG C-02.....	79
TABLA XX. CANTIDAD DE CV PARA LÍMITES DE ATTERBERG C-03.....	80
TABLA XXI. CANTIDAD DE CV PARA PROCTOR MODIFICADO C-01	81
TABLA XXII. CANTIDAD DE CV PARA PROCTOR MODIFICADO C-02.....	81
TABLA XXIII. CANTIDAD DE CV PARA PROCTOR MODIFICADO C-03	82
TABLA XXIV. CANTIDAD DE CV PARA CBR EN LABORATORIO C-01.....	83
TABLA XXV. CANTIDAD DE CV PARA CBR EN LABORATORIO C-02.....	83
TABLA XXVI. CANTIDAD DE CV PARA CBR EN LABORATORIO C-03.....	84
TABLA XXVII. CONTENIDO DE HUMEDAD DE MUESTRAS EN ESTADO NATURAL.....	86

TABLA XXVIII. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	87
TABLA XXIX. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA	89
TABLA XXX. RESULTADOS LÍMITES DE ATTERBERG	90
TABLA XXXI. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	91
TABLA XXXII. RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO NATURAL.....	91
TABLA XXXIII. RESULTADOS DE CBR NATURAL	92
TABLA XXXIV. RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA	95
TABLA XXXV. RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-01.....	96
TABLA XXXVI. RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-01 PROMEDIO	97
TABLA XXXVII. RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-02.....	98
TABLA XXXVIII. RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-02 PROMEDIO.....	99
TABLA XXXIX. RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-03.....	100
TABLA XL. RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-03 PROMEDIO.....	101
TABLA XLI. RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+CV C-01	106
TABLA XLII. RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+CV C-02	110
TABLA XLIII. RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+CV C-03	114
TABLA XLIV. RESULTADOS DEL CBR NATURAL C-01	117
TABLA XLV. RESULTADOS DEL CBR NATURAL C-02	118
TABLA XLVI. RESULTADOS DEL CBR NATURAL C-03	120
TABLA XLVII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 95% S.N.+5% C.V.-C-01	121
TABLA XLVIII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 90% S.N.+10% C.V.-C-01	123
TABLA XLIX. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 85% SN+ 15% CV. C-01.....	124
TABLA L. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 80% SN+ 20% CV. C-01	126
TABLA LI. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 70% SN+ 30% CV. C-01	127
TABLA LII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 95% SN+ 5% CV. C-02	129
TABLA LIII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 90% SN+ 10% CV. C-02	130
TABLA LIV. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 85% SN+ 15% CV. C-02	132
TABLA LV. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 80% SN+ 20% CV. C-02	133
TABLA LVI. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 70% SN+ 30% CV. C-02	135
TABLA LVII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 95% SN+ 5% CV. C-03.....	136

TABLA LVIII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 90% SN+ 10% CV. C-03.....	138
TABLA LIX. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 85% SN+ 15% CV. C-03.....	139
TABLA LX. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 80% SN+ 20% CV. C-03.....	141
TABLA LXI. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 70% SN+ 30% CV. C-03.....	142
TABLA LXII. RESULTADOS DE DENSIDAD DE CAMPO-GRADO DE COMPACTACIÓN...	143
TABLA LXIII. RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA NATURAL.....	143
TABLA LXIV. RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA EXPERIMENTAL.....	144
TABLA LXV. ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CEMENTO.....	146
TABLA LXVI. ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CAL.....	147
TABLA LXVII. ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CENIZA VOLCÁNICA.....	148

Lista de figuras

FIG. 1.	CLASIFICACIÓN AASTHO [18].....	26
FIG. 2.	CLASIFICACIÓN SUCS [18].	27
FIG. 3.	TIPOS DE SUELOS [13].....	27
FIG. 4.	ENSAYO DE HIDROMETRÍA EN LABORATORIO.....	35
FIG. 5.	EQUIPO DE CBR [26]	42
FIG. 6.	COMPONENTES DEL EQUIPO [34].....	43
FIG. 7.	MAPA GEOTÉCNICO DE CHICLAYO.....	46
FIG. 8.	EXCAVACIÓN CALICATA 01.....	57
FIG. 9.	EXCAVACIÓN CALICATA 02.....	58
FIG. 10.	EXCAVACIÓN CALICATA 03.....	58
FIG. 11.	EXCAVACIÓN CALICATA 04.....	59
FIG. 12.	EXCAVACIÓN CALICATA 05.....	59
FIG. 13.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 01	60
FIG. 14.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 02	60
FIG. 15.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 03	61
FIG. 16.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 04	61
FIG. 17.	PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 05	62
FIG. 18.	UBICACIÓN DEL VOLCÁN SABANCAYA - AREQUIPA	63
FIG. 19.	RECOLECCIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA.....	64
FIG. 20.	RESULTADOS DE COMPONENTES QUÍMICOS DE CENIZA VOLCÁNICA	65
FIG. 21.	PESO DE LA MUESTRA EN ESTADO NATURAL.....	66
FIG. 22.	ENSAYO CONTENIDO DE HUMEDAD.....	67
FIG. 23.	ENSAYO LÍMITE LÍQUIDO	68
FIG. 24.	ENSAYO LÍMITE PLÁSTICO.....	69
FIG. 26.	MUESTRAS PARA ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO	70
FIG. 27.	ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO	71
FIG. 28.	ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA RELATIVA A LOS SÓLIDOS	72
FIG. 29.	ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO	73

FIG. 30.	PREPARACIÓN DE MATERIAL PARA ENSAYO CBR EN LABORATORIO	74
FIG. 31.	ENSAYO CBR EN LABORATORIO.....	75
FIG. 32.	NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA.....	76
.....		76
FIG. 33.	DENSIDAD DE CAMPO DEL TRAMO DE PRUEBA.....	76
FIG. 34.	PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO	77
FIG. 35.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE ESPECTROMETRÍA DE RAYOS X	157
FIG. 36.	CURVA DE PÉRDIDA DE MASA - ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	158
FIG. 37.	RESULTADOS DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DE CENIZA VOLCÁNICA .	160

Lista de gráficos

GRÁFICO 1.	ESTRATEGIA PARA DEMOSTRAR LA HIPÓTESIS.....	55
GRÁFICO 2.	CURVA GRANULOMÉTRICA DE LAS 5 CALICATAS	88
GRÁFICO 3.	CURVA GRANULOMÉTRICA POR HIDROMETRÍA.....	89
GRÁFICO 4.	RESULTADOS DE HIDROMETRÍA CALICATA 01	93
GRÁFICO 5.	RESULTADOS DE HIDROMETRÍA CALICATA 02	94
GRÁFICO 6.	RESULTADOS DE HIDROMETRÍA CALICATA 03	94
GRÁFICO 7.	VARIACIÓN DEL ÍNDICE PLÁSTICO PARA C-01 + ADICIÓN DE CV	97
GRÁFICO 8.	PROMEDIO DEL ÍNDICE PLÁSTICO PARA C-01 + ADICIÓN DE CV	98
GRÁFICO 9.	VARIACIÓN DE ÍNDICE PLÁSTICO PARA C-02 + ADICIÓN DE CV.....	99
GRÁFICO 10.	PROMEDIO DEL ÍNDICE PLÁSTICO + ADICIÓN DE CV	100
GRÁFICO 11.	VARIACIÓN DE ÍNDICE PLÁSTICO PARA C-03 + ADICIÓN DE CV.....	101
GRÁFICO 12.	PROMEDIO DE ÍNDICE PLÁSTICO + ADICIÓN DE CV	102
GRÁFICO 13.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN C-01	103
GRÁFICO 14.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO DE SN+5%CV C-01.....	104
GRÁFICO 15.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO DE SN+10%CV C-01.....	104
GRÁFICO 16.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+15%CV C-01	105
GRÁFICO 17.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+20%CV C-01	105
GRÁFICO 18.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+30%CV C-01	106
GRÁFICO 19.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN C-02	107
GRÁFICO 20.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+5CV C-02	108
GRÁFICO 21.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+10CV C-02	108
GRÁFICO 22.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+15CV C-02	109
GRÁFICO 23.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+20CV C-02	109
GRÁFICO 24.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+30CV C-02	110
GRÁFICO 25.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN C-03	111
GRÁFICO 26.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+5% CV C-03	112
GRÁFICO 27.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+10%CV C-03	112
GRÁFICO 28.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+15%CV C-03	113
GRÁFICO 29.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO DE SN+20%CV C-03.....	113

GRÁFICO 30.	RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO DE SN+30%CV C-03.....	114
GRÁFICO 31.	RESULTADOS DE CBR NATURAL C-01	116
GRÁFICO 32.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN SUELO NATURAL C-01	116
GRÁFICO 33.	RESULTADOS DE CBR NATURAL C-02.....	117
GRÁFICO 34.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN SUELO NATURAL C-02	118
GRÁFICO 35.	RESULTADOS DE CBR NATURAL C-03.....	119
GRÁFICO 36.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN SUELO NATURAL C-03	119
GRÁFICO 37.	RESULTADOS DE CBR 95% S.N. + 5% C.V. – C-01.....	120
GRÁFICO 38.	RESULTADO DE EXPANSIÓN 95% SN + 5% CV - C01.....	121
GRÁFICO 39.	RESULTADOS DE CBR 90% S.N.+10% C.V. – C-01.....	122
GRÁFICO 40.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 90% SN+10% CV – C-01.....	122
GRÁFICO 41.	RESULTADOS DE CBR 85% S.N.+15% C.V. – C-01.....	123
GRÁFICO 42.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 85% SN+15% CV – C-01.....	124
GRÁFICO 43.	RESULTADOS DE CBR 80% S.N.+20% C.V. – C-01.....	125
GRÁFICO 44.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 80% SN+20% CV – C-01.....	125
GRÁFICO 45.	RESULTADOS DE CBR 70% S.N.+30% C.V. – C-01.....	126
GRÁFICO 46.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 70% SN+30% CV – C-01.....	127
GRÁFICO 47.	RESULTADOS DE CBR 95% S.N.+5% C.V. – C-02.....	128
GRÁFICO 48.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 95% SN+5% CV – C-02.....	128
GRÁFICO 49.	RESULTADOS DE CBR 90% S.N.+10% C.V. – C-02.....	129
GRÁFICO 50.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 90% SN+10% CV – C-02.....	130
GRÁFICO 51.	RESULTADOS DE CBR 85% S.N.+15% C.V. – C-02.....	131
GRÁFICO 52.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 85% SN+15% CV – C-02.....	131
GRÁFICO 53.	RESULTADOS DE CBR 80% S.N.+20% C.V. – C-02.....	132
GRÁFICO 54.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 80% SN+20% CV – C-02.....	133
GRÁFICO 55.	RESULTADOS DE CBR 70% S.N.+30% C.V. – C-02.....	134
GRÁFICO 56.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 70% SN+30% CV – C-02.....	134
GRÁFICO 57.	RESULTADOS DE CBR 95% S.N.+5% C.V. – C-03.....	135
GRÁFICO 58.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 95% SN+5% CV – C-03.....	136
GRÁFICO 59.	RESULTADOS DE CBR 90% S.N.+10% C.V. – C-03.....	137

GRÁFICO 60.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 90% SN+10% CV – C-03.....	137
GRÁFICO 61.	RESULTADOS DE CBR 85% S.N.+15% C.V. – C-03.....	138
GRÁFICO 62.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 85% SN+15% CV – C-03.....	139
GRÁFICO 63.	RESULTADOS DE CBR 80% S.N.+20% C.V. – C-03.....	140
GRÁFICO 64.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 80% SN+20% CV – C-03.....	140
GRÁFICO 65.	RESULTADOS DE CBR 70% S.N.+30% C.V. – C-03.....	141
GRÁFICO 66.	RESULTADOS DE EXPANSIÓN 70% SN+30% CV – C-03.....	142

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la incorporación de ceniza volcánica en la estabilización de arcillas expansivas, con miras a su uso como subrasante en el distrito de La Victoria, Chiclayo. Se adoptó un enfoque experimental mediante la creación de mezclas que contenían distintas proporciones de ceniza volcánica. Los resultados más favorables se lograron con una mezcla compuesta por 70% de suelo natural y 30% de ceniza volcánica, lo que permitió alcanzar valores del CBR (California Bearing Ratio) entre 19.27% y 24.34%, y una reducción del porcentaje de expansión a un rango de 1.60% a 1.72%, que se encuentran por debajo del límite normativo de 3%. Estos resultados demuestran que un 30% de ceniza volcánica es la cantidad óptima para mejorar significativamente las propiedades físicas y mecánicas del suelo, lo que permite su utilización adecuada como subrasante en la infraestructura vial.

Palabras clave: Ceniza volcánica, arcillas expansivas, subrasante, estabilización de suelos y propiedades mecánicas

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the impact of incorporating volcanic ash in the stabilization of expansive clays, with a view to their use as subgrade in the district of La Victoria, Chiclayo. An experimental approach was adopted by creating mixtures containing different proportions of volcanic ash. The most favorable results were achieved with a mixture composed of 70% natural soil and 30% volcanic ash, which allowed achieving CBR (California Bearing Ratio) values between 19.27% and 24.34%, and a reduction of the expansion percentage to a range of 1.60% to 1.72%, which are below the regulatory limit of 3%. These results demonstrate that 30% volcanic ash is the optimum amount to significantly improve the physical and mechanical properties of the soil, allowing its adequate use as a subgrade in road infrastructure.

Keywords: Volcanic ash, expansive clays, subgrade, soil stabilization and mechanical properties

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los suelos arcillosos expansivos representan uno de los principales desafíos para la ingeniería civil, especialmente cuando se trata de la construcción de infraestructuras viales. Estos suelos tienen un comportamiento impredecible que se caracteriza por grandes variaciones volumétricas debido a la fluctuación de su contenido de humedad. Cuando los suelos absorben agua, tienden a expandirse, mientras que cuando el agua se evapora, se contraen. Este fenómeno provoca la alteración de la estabilidad de las subrasantes y genera deformaciones en las estructuras construidas sobre ellos. Las variaciones de volumen del suelo pueden ocasionar fisuras y asentamientos desiguales, afectando negativamente la resistencia y durabilidad de las obras. [1].

Del mismo modo, las subrasantes generadas por arcillas en expansión presentan comportamientos específicos en respuesta a los ciclos de humedad y sequía, dando lugar a asentamientos irregulares a lo largo de la carretera. Estas fluctuaciones de humedad generan deformaciones diferenciales entre el centro de la carretera y sus extremos, facilitando la producción de grietas longitudinales y poniendo en peligro la integridad global de la construcción de la carretera desde sus cimientos. Este ejemplo demuestra la complejidad del comportamiento de este tipo de suelos, imposible de prever y controlar incluso con procedimientos modernos de estabilización [2].

Expansive clay soils have posed a significant difficulty in nations such as India due to their susceptibility to moisture fluctuations. These soils expand when absorbing water and compress when drying, resulting in significant settling and cracking of road structures. This behavior has been observed in numerous locations of the country, and it has a direct impact on the subgrade's bearing capacity. As a result, road development on this sort of terrain necessitated additional technical solutions to counteract the detrimental impacts of changeable wetness, raising the cost and complexity of road projects [3].

Perú presenta una gran variedad de tipos de suelo debido a su complicada geografía y a la variabilidad del clima. Este estado ofrece un problema constante para la construcción y el mantenimiento de infraestructuras. Los suelos cohesivos, como las arcillas expansivas, están entre los más difíciles, ya que su inestabilidad en respuesta a las fluctuaciones de humedad causa importantes complicaciones. Estos suelos se expanden cuando absorben agua y se contraen cuando la pierden, lo que provoca asentamientos desiguales y fisuras que ponen en

peligro la integridad y durabilidad de las estructuras. Debido a este variado comportamiento, las subrasantes construidas sobre este tipo de suelos requieren soluciones técnicas específicas, como la estabilización de suelos, para limitar el peligro de daños catastróficos y optimizar al mismo tiempo los costes de mantenimiento y reparación [4].

En la región de Campo Verde, Ucayali, se identificaron suelos predominantemente compuestos por arcillas expansivas. Estos suelos, al estar expuestos a un clima de elevada humedad relativa y a un elevado nivel de capa freática, manifestaron graves problemas de inestabilidad en la subrasante. Estas condiciones provocaron fluctuaciones volumétricas del suelo, lo que resultó en asentamientos desiguales e impactó de manera negativa las estructuras construidas, particularmente en proyectos de vía y edificación [5].

En la ciudad de Cajamarca, en la Prolongación de la Avenida Perú, entre el Jr. y el Jr. Japón y el Japón Junior. Se constató un deterioro significativo de la trocha carrozable, atribuido a la presencia de suelos cohesivos de naturaleza expansiva. Estos suelos, al experimentar alteraciones volumétricas debido a las fluctuaciones de humedad, han sufrido daños estructurales significativos. Estos daños se han intensificado debido a la acción de los agentes atmosféricos y la continua abrasión del tránsito vehicular, lo que ha generado inseguridad, retrasos y dificultades de acceso para los usuarios de esta vía [6].

En el ámbito local, en la Urbanización Urrunaga Sector 1 del distrito de José Leonardo Ortiz, se detectó la presencia de suelos de partículas finas con propiedades expansivas de moderada a alta, lo cual provocó una variación considerable en el volumen del terreno. Esta circunstancia, junto con la limitada capacidad de drenaje superficial, contribuyó a la degradación progresiva de la infraestructura vial existente, restringiendo el acceso vehicular y complicando la conexión con servicios fundamentales, particularmente en situaciones de vulnerabilidad climática como el fenómeno El Niño [7].

Dado el problema existente en el distrito de La Victoria, vinculado con la presencia de suelos expansivos, y en la búsqueda de una alternativa de solución, el propósito de este estudio es evaluar la repercusión de la adición de ceniza volcánica en dichos suelos. En el marco actual, se plantea la siguiente interrogante de investigación: ¿Cuál es la influencia de la adición de cenizas volcánicas en diferentes porcentajes en las propiedades físico-mecánicas de las arcillas expansivas para el uso como subrasante en el distrito la Victoria - Chiclayo? Justificación de la investigación

Esta investigación está justificada económicamente por los problemas que plantean los suelos arcillosos expansivos en la ingeniería civil. Cuando estos suelos absorben humedad, crean tensiones internas que amenazan su estabilidad, dando lugar a problemas estructurales que elevan los costes de construcción y mantenimiento. Aunque existen materiales estabilizantes convencionales como el cemento, la cal y los polímeros, su uso suele asociarse a precios elevados y a un importante impacto ambiental. Ante esta circunstancia, diversos estudios han sugerido que las cenizas volcánicas, con su alta concentración de sílice y alúmina, podrían ser una forma más rentable y sostenible de mejorar las cualidades del suelo [8]. En este contexto, la ceniza volcánica se perfila como una alternativa viable y prometedora, gracias a su abundancia, bajo costo y capacidad para mejorar el comportamiento de los suelos arcillosos expansivos.

Esta ceniza, subproducto natural de la actividad volcánica, tiene propiedades físicas y químicas que la hacen adecuada para la estabilización de suelos. Su textura finamente separada y su fuerte reactividad química permiten mejorar la compactación y la resistencia del suelo, lo que se traduce en una solución más eficaz y sostenible en los proyectos de ingeniería de carreteras [8]. Además, su capacidad para absorber agua puede ayudar a gestionar los cambios volumétricos inducidos por la humedad, reduciendo la expansión y contracción del suelo.

Aunque las cenizas volcánicas tienen un gran potencial como estabilizador de suelos, es necesario seguir investigando para determinar su utilidad y el impacto que pueden tener en diversos contextos. El objetivo de este estudio es examinar a fondo el uso de cenizas volcánicas como adición para mejorar el comportamiento de suelos arcillosos expansivos, evaluando su impacto en las características físicas y mecánicas fundamentales. Se realizarán experimentos de laboratorio para recopilar datos precisos y confirmar la viabilidad técnica de esta solución. Los resultados de este estudio no sólo contribuirán al conocimiento científico en el campo de la ingeniería civil, sino que también pueden ofrecer una opción más sostenible y rentable para estabilizar suelos inestables en proyectos de infraestructuras.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el efecto que tiene la adición de ceniza volcánica sobre las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos expansivos utilizados como subrasante en el distrito de La Victoria. Para alcanzar este propósito general, se han definido una serie de objetivos específicos que orientan el desarrollo del estudio.

En primer lugar, se identificará la composición química de la ceniza volcánica mediante un análisis por difracción de rayos X, lo cual permitirá conocer los componentes activos del material estabilizante. Posteriormente, se evaluarán las propiedades físicas y mecánicas del suelo en su estado natural y tras la incorporación de distintos porcentajes de ceniza volcánica (5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 30 %), con el fin de observar las variaciones y mejoras que esta adición pueda generar. A partir de estos resultados, se determinará el porcentaje óptimo que ofrezca un equilibrio adecuado entre las propiedades analizadas.

Una vez definido ese porcentaje, se aplicará el ensayo DCP (Dynamic Cone Penetrometer) en campo para verificar si los resultados de laboratorio se reflejan en condiciones reales. Finalmente, se realizará un análisis económico que permita evaluar la viabilidad del uso de la ceniza volcánica como alternativa sostenible y rentable para la estabilización de suelos arcillosos expansivos.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Antecedentes

Villacís et.al [9] **“Estabilización de arcillas con ceniza volcánica y ceniza de cascarilla de arroz”**

En su investigación, presenta como objetivo estabilizar arcillas expansivas utilizando ceniza volcánica y ceniza de cáscara de arroz, además de inspeccionar su comportamiento físico y mecánico del suelo arcilloso con diversos porcentajes del aditivo. La metodología utilizada consistió en adiciones del 10%, 20% y 30% en proporciones equivalentes de ambas cenizas. Adicionalmente, se empleó un análisis morfológico mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) para reconocer la superficie de las muestras con señales de electrones secundarios, logrando resoluciones de 100 μm y 20 μm respectivamente. Los hallazgos obtenidos indicaron la disminución considerable de los límites líquido y plástico, así como del índice plástico. El índice de expansión transitó de ser extremadamente elevado a medio, y en ciertas circunstancias de medio a bajo. El 20% fue el que exhibió los resultados más favorables en la mayoría de las muestras examinadas, disminuyendo el índice de expansión hasta un 54,98% y mejorando la cohesión del suelo. Para la muestra M3, el potencial de expansión experimentó una transición de medio a bajo con un 30%, logrando un índice de expansión de 48,58 y una cohesión de 1,34 kg/cm². Concluyeron que la combinación de cenizas optimiza considerablemente las propiedades físicas, mecánicas y composicionales de los suelos arcillosos con tendencia expansiva, disminuyendo el índice plástico, la expansión y aumentando la cohesión y el ángulo de fricción del terreno. La contribución de esta investigación a este estudio es evidenciar que la ceniza volcánica, en combinación con otros desechos industriales como la ceniza de cáscara de arroz, puede funcionar como un estabilizante eficiente para suelos arcillosos expansivos, particularmente en proporciones del 20%, mejorando sus propiedades para su utilización como subrasante en proyectos de infraestructura vial.

Ahamad et.al [10] **“Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review”**

En su artículo presenta como objetivo examinar la efectividad de la estabilización de suelos expansivos mediante el uso de cenizas volantes puzolánicas industriales, tanto con cómo sin la incorporación de aditivos secundarios. El enfoque metodológico utilizado fue experimental, evaluando el comportamiento del suelo tratado con un 25% de ceniza volante y un 5% de biocemento como aglutinante no tradicional. Los hallazgos resultantes incluyen mejoras

significativas en la plasticidad, resistencia a la compresión y penetración, además de una disminución significativa en la hinchazón y la compresibilidad del suelo. El coeficiente de carga de California (CBR) experimentó un incremento, alcanzando niveles que oscilan entre el 52% y el 55%, lo cual representa un avance significativo en la capacidad de carga de la subrasante. Concluyeron que la aplicación de cenizas volantes industriales, particularmente en combinación con biocemento, provoca reacciones puzolánicas que alteran la mineralogía y la composición química del suelo, disminuyendo su potencial de expansión y optimizando sus propiedades físico-mecánicas. La contribución de esta investigación a la presente investigación es evidenciar que los desechos industriales con propiedades puzolánicas, como las cenizas volantes, pueden ser empleados de manera eficiente para la estabilización de suelos arcillosos expansivos. Además, la incorporación de aglutinantes no convencionales puede potenciar estos efectos, lo que respalda la utilización de cenizas volcánicas en la mejora de subrasantes.

Liu et. al [11], **“Evaluation of brown coal fly ash for stabilising expansive clay subgrade: A sustainable solution for pavement construction”**

La intención de este estudio fue mejorar la estabilidad de los suelos de arcilla expansiva mediante el uso de cenizas volantes de lignito (BCFA) como alternativa sostenible en la edificación de pavimentos. El propósito fue optimizar la estabilidad de suelos de arcilla expansiva mediante el uso de cenizas volantes de lignito (BCFA) como opción sostenible en la edificación de pavimentos. El enfoque metodológico adoptado fue experimental, abarcando pruebas de resistencia a la compresión no confinada (UCS), triaxial con carga reiterada (RLT), índice de soporte californiano saturado (CBR), corte directo y pruebas de contracción-hinchazón. Los hallazgos derivados indicaron una elevación en la resistencia a la compresión, el módulo de resiliencia, la cohesión y el CBR saturado, además de una disminución notable en el índice de contracción-hinchazón y la deformación correspondiente. El módulo de resiliencia más elevado alcanzado fue de 82,52 MPa y el CBR saturado fue de 3,41%. Ambos resultados se alcanzaron con un contenido de BCFA del 3 %, que se identificó como el porcentaje óptimo para la consolidación. Concluyeron que las cenizas volantes de lignito, a pesar de ser un residuo de calidad inferior, son eficaces en la estabilización de subrasantes de arcilla expansiva, aportando mejoras significativas en el comportamiento mecánico y minimizando el impacto ambiental vinculado a su utilización. La contribución de esta investigación es evidenciar que desechos industriales, incluso de calidad inferior, pueden ser utilizados eficientemente en la estabilización de suelos arcillosos, respaldando la utilización de cenizas volcánicas como una alternativa sostenible y viable para la mejora de subrasantes.

Zimar et al. [12] **“Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review”**

El objetivo de este estudio fue investigar el papel de las cenizas volantes de carbón (CFA) en la estabilización de subrasantes, específicamente su efecto sobre varias propiedades físico-mecánicas del suelo. El enfoque utilizado fue un examen experimental, con pruebas que incluían el índice de plasticidad, el comportamiento de compactación, la resistencia a la compresión, el CBR, el módulo robusto, la deformación permanente y las cualidades de consolidación. Los resultados mostraron que el índice de plasticidad se reduce con el aumento de la concentración de CFA y FFA, con una caída significativa en los suelos de tipo CH (arcilla de alta plasticidad). El módulo de resiliencia experimentó un incremento con la incorporación de hasta un 15% de cenizas volantes, y el periodo de curación contribuyó a la mejora de este parámetro hasta en un 40%, particularmente en el intervalo de 7 a 14 días de curación. Adicionalmente, durante el proceso de estabilización se detectaron reacciones de puzolánica y de intercambio catiónico, con la reacción puzolánica ejerciendo un impacto más significativo en la optimización de las propiedades del suelo. Concluyeron que la integración de cenizas volantes de carbón optimiza notablemente las propiedades mecánicas del suelo, particularmente el módulo de resiliencia, lo cual promueve la estabilidad de las subrasantes para pavimentos. Este estudio contribuye con una base comparativa sobre el comportamiento mecánico de suelos arcillosos estabilizados con residuos puzolánicos, lo que respalda la exploración de la ceniza volcánica como una opción factible para la estabilización de arcillas expansivas en la subrasante.

Vargas [13], **“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”**

En su tesis presenta el propósito de evaluar la aplicación de ceniza volcánica para estabilizar un suelo arcilloso con el propósito de optimizar la subrasante en un segmento específico de la carretera. La metodología fue experimental, la cual implicó en la incorporación de ceniza volcánica en tres proporciones distintas: 15%, 20% y 25%, efectuando pruebas para examinar las alteraciones en las propiedades mecánicas y físicas del suelo. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, mostrando mejoras significativas con el 20% de adición de ceniza, donde el CBR aumentó en un 61.02%. Asimismo, se redujo el índice de expansión a los 4 días de

1.074% a 0.304% con un 15% de adición. Además, se observó una notable variación en propiedades como la plasticidad y la expansión del suelo, confirmando la efectividad de la ceniza volcánica como estabilizante. Concluyó que la aplicación de ceniza volcánica no solo optimiza las características del suelo arcilloso, sino que también constituye una opción sustentable al atenuar la explotación minera y minimizar el impacto ambiental. Esto se debe a que este material se halla de manera natural en volúmenes significativos y no demanda procesos onerosos para su empleo. La contribución de esta disertación a la presente investigación radica en la corroboración del empleo de ceniza volcánica como un estabilizante eficaz para suelos arcillosos en subrasantes, consolidando la factibilidad técnica y ambiental de su implementación en la edificación vial.

Mamani y Yataco [14], **“Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho”**

El propósito de la investigación fue establecer cómo la ceniza de madera de fondo, un producto residual de una ladrillera puede estabilizar suelos arcillosos para su aplicación como subrasante optimizada de pavimento. El enfoque metodológico adoptado fue aplicado, adoptando un diseño experimental. Se implementó un muestreo intencional no probabilístico con cuatro muestras de suelo arcilloso combinadas con diversas proporciones de ceniza de madera de fondo (10%, 20% y 30%). Los hallazgos derivados evidenciaron una mejora notable en las propiedades del suelo. El índice de plasticidad experimentó una disminución, mientras que el CBR experimentó un incremento significativo: el suelo sin tratamiento registró un CBR de 7.7%, la mezcla con 20% de ceniza logró un CBR de 16.9%, mientras que la mezcla con 40% de ceniza logró un CBR de 23.5%. Adicionalmente, se registró un incremento en la consistencia y la gravedad específica de las partículas sólidas. Concluyeron que la incorporación de ceniza de madera de fondo logra una estabilización efectiva del suelo arcilloso, optimizando sus características mecánicas y facilitando su aplicación como subrasante en pavimentos. La contribución de este estudio al presente estudio se centra en evidenciar que un residuo con propiedades cementantes puede optimizar de manera significativa las propiedades de arcillas expansivas. Asimismo, se puede investigar de que las cenizas volcánicas, también de procedencia natural, pueden actuar como estabilizantes eficaces en suelos arcillosos cuando se utilizan en proporciones apropiadas, mejorando la subrasante en regiones como La Victoria – Chiclayo.

Vilcas [15], **“Estabilización de Suelos Arcillosos Adicionando Ceniza de Ladrillo en Vías no Pavimentadas”**

El propósito de la investigación fue analizar el impacto de la adición de ceniza de ladrillo en la estabilidad de los suelos arcillosos en vías no pavimentadas. El enfoque metodológico adoptado fue explicativo con diseño experimental, implementando el método científico. Se llevaron a cabo pruebas de límite líquido (LL), límite plástico (LP), compactación Proctor y CBR, empleando tres proporciones de ceniza de ladrillo: 10%, 20% y 30% respectivamente. Los hallazgos resultantes fueron notables: la densidad seca máxima se incrementó en un 8.06% (de 1.86 g/cm³ a 2.01 g/cm³), la humedad óptima experimentó una disminución del 15.59% (de 11.11% a 9.38%) y el CBR al 100% se elevó del 4.93% al 22.87%, lo que indica una mejora del 363.51%. El CBR al 95% experimentó un incremento de 4.60% a 20.83%, lo que equivale a una variación del 352.90%. Se concluyó que la adición de ceniza de ladrillo mejora de manera notable las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos, incrementando su capacidad de soporte y reduciendo la humedad necesaria para su correcta compactación. La relevancia de esta investigación para el presente estudio radica en que ofrece un marco de referencia sobre el comportamiento de suelos arcillosos estabilizados con residuos que poseen características cementantes, como es el caso de la ceniza. Esto resulta útil para comparar metodologías y resultados al aplicar otros tipos de residuos similares, como la ceniza volcánica.

BASES TEÓRICO-CIENTÍFICAS

Suelo

La Comisión Europea define el suelo como la capa más externa de la corteza terrestre, formada por minerales, agua, materia orgánica y otros componentes. Este término subraya el carácter dinámico del suelo, que es una consideración importante a la hora de planificar y llevar a cabo proyectos de construcción. El suelo es importante en ingeniería civil porque sus cualidades tienen un impacto directo en la estabilidad y capacidad portante de cualquier construcción. Por ello, antes de iniciar cualquier obra de construcción, es fundamental realizar un análisis exhaustivo del suelo para verificar que la estructura se construye sobre unos cimientos sólidos y seguros [16].

Características del suelo

Las cualidades del suelo incluyen características tanto físicas como químicas, que influyen directamente en su capacidad y funcionamiento en muchas aplicaciones como la agricultura y la construcción. Estas cualidades incluyen la textura, la estructura, la capacidad de retención de agua, la permeabilidad y la densidad, entre otras. Cada una de estas cualidades es fundamental para la estabilidad de las estructuras sustentadas por el suelo, así como para otras aplicaciones relacionadas con el ser humano [16].

La textura: del suelo se refiere al tamaño de las partículas minerales que lo componen, y es un factor clave que determina muchas de sus propiedades. Esta se clasifica según la proporción relativa de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. Por ejemplo, los suelos con un alto contenido de arcilla tienden a retener mejor el agua y los nutrientes, aunque también pueden ser más propensos a la compactación [17].

La densidad: afecta la distribución de la vegetación, determina la cantidad de vegetación que puede soportar. Los suelos con mayor densidad, al retener mejor tanta agua como nutrientes, suelen favorecer el crecimiento de una mayor cobertura vegetal. Esta característica es fundamental en la construcción, ya que suelos más densos proporcionan una base más estable para edificaciones y estructuras [17].

El color: es influenciado por sus componentes, varía según la cantidad de humedad presente en él. A través del color es posible inferir aspectos relacionados con fertilidad y composición química. Por ejemplo, los suelos oscuros suelen indicar una mayor cantidad de materia

orgánica, mientras que los suelos más claros pueden estar asociados con una menor cantidad de materia orgánica y nutrientes [17].

Clasificación de suelos

Clasificación del suelo- AASHTO

En esta sección se menciona a los 7 grupos numerados tal como se indica a continuación: A-1 (arena y cascajo), A-2 (arenas finas), A-3 (arenas con arcillas, limos y cascajos), A-4 y A-5 (limos) y A-6 y A-7 (arcillosos). Estos según las propiedades indican que A-1 y A-3 reflejan suelos buenos y excelentes, A-2 se clasifica como suelos moderados y buenos, A-6 y A-7 concuerdan a suelos de calidad comedia a pobre [18].

Cuadro 4.3
Signos Convencionales para Perfil de Calicatas – Clasificación AASHTO

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

Fig. 1. Clasificación AASTHO [18].

Clasificación del suelo- SUCS

En esta sección la presente clasificación se diferencia entre suelos finos y granulares, siendo los primero aquellos que pasan a través de un tamiz de 75 mm. Por otro lado, un suelo se clasifica como fino cuando sobrepasa más del 50% del material por el Tamiz 200, de no ser así, se reconoce como suelo granular [18].

Cuadro 4.4
Signos Convencionales para Perfil de Calicatas – Clasificación SUCS

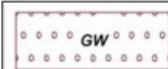
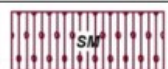




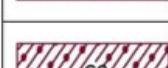



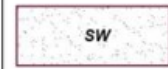


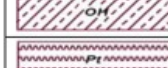

	Grava bien graduada, mezcla de grava con poco o nada de materia fino, variación en tamaños granulares		Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy bajo
	Grava mal graduada, mezcla de arena-grava con poco o nada de material fino		Arena arcillosa, mezcla de arena-arcillosa
	Grava limosa, mezcla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

Fig. 2. Clasificación SUCS [18].

Tipos de suelos

Existen diversas categorías de suelos que se distinguen según las características físicas y su composición, entre los más habituales se encuentran los suelos de tipo arenoso, limos y los arcillosos.

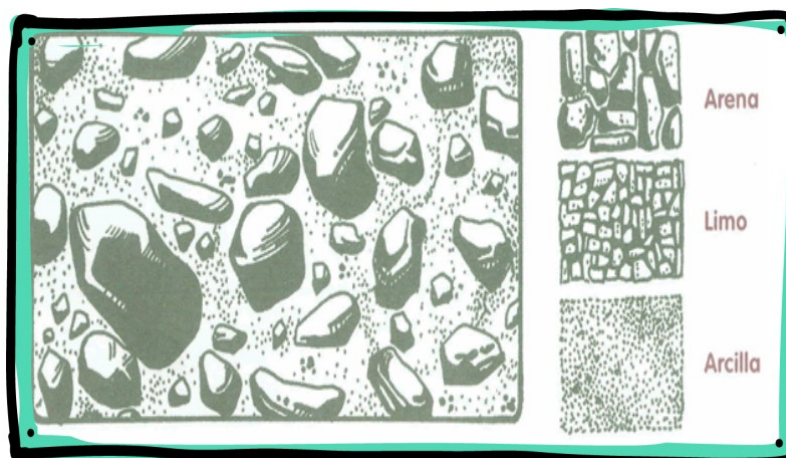


Fig. 3. Tipos de suelos [13]

Suelos Arcillosos:

Un suelo arcilloso se compone de partículas de arcilla, que son rocas sedimentarias descompuestas en fragmentos diminutos, generalmente menores a 0.02 mm. Su composición incluye, en gran parte, silicatos de aluminio, hierro, magnesio y otros minerales. Una de las propiedades más relevantes es la capacidad de adquirir una textura plástica al mezclarse con agua, lo que los convierte en materiales útiles en sectores, como la cerámica y la construcción [19].

Tipos de arcillas

La clasificación de las arcillas se realiza tomando en cuenta las estructuras cristalinas presentes, las cuales influyen directamente en sus características físicas. Los principales tipos de minerales arcillosos son:

Caolinitas: son minerales arcillosos que se caracterizan por su estructura laminar, compuesta por capas alternas de sílice y alúmina. Esta unión compacta impide que el agua penetre fácilmente, otorgando una alta estabilidad al material incluso en presencia de humedad. Esta consistencia se debe a la estructura cristalina de la caolinita, que le confiere propiedades particulares como una buena resistencia a la compresión, baja contracción y una plasticidad moderada [20].

Montmorillonitas: son minerales arcillosos caracterizados por su estructura de capas, donde una capa de alúmina se encuentra entre dos capas de sílice. Las fuerzas de unión entre estas capas son débiles, permitiendo que las moléculas de agua se infiltren fácilmente. Esta característica da lugar a un aumento de volumen en los cristales, lo que se conoce como expansión [20].

Illitas: son minerales arcillosos que comparten similitudes en su estructura con las arcillas montmorillonitas, aunque tienden a formar agrupaciones de partículas que limitan en contacto directo con el agua. Como resultado, su capacidad de expansión es menor, lo que las hace más estables ante la presencia de humedad. Las illitas se encuentran ampliamente distribuidas en distintos entornos geológicos [20].

Propiedades físicas del suelo

Granulometría por sedimentación: Estas propiedades se reconocen con más confianza a través de la consistencia de la plasticidad de los materiales, en lugar de tener en cuenta solo su distribución granulométrica. Sin embargo, esta propiedad resalta, cuando se demanda hacer uso de clasificar los suelos teniendo en cuenta el diámetro de sus partículas, para lo cual se necesita un análisis granulométrico por sedimentación [21].

Plasticidad: es una característica fundamental de las arcillas, ya que el agua forma una capa alrededor de las partículas en formas de láminas, funcionando como lubricante natural. Esta condición puede facilitar el deslizamiento cuando el suelo está sometido a cargas. La plasticidad se define como la habilidad del material para deformarse sin fracturarse al someterse a una fuerza [21].

Para evaluar esta característica, se llevan a cabo los límites establecidos por Atterberg:

Los Límites de Atterberg: se refieren a los cambios de estado del suelo en función de diferentes niveles de humedad, dividiéndose en tres estados: sólida, plástica y líquida. Estos límites se obtienen mediante pruebas específicas que determinan en qué momento el suelo pasa de un estado a otro [21].

El límite líquido (LL): es el nivel de humedad a partir del cual el suelo comienza a fluir como si fuera un líquido, debido a su propio peso [21].

El límite plástico (LP): representa la cantidad mínima de agua necesaria para que el suelo pueda moldearse sin que se rompa, mostrando un comportamiento plástico [21].

Índice de plasticidad (IP): corresponde a la diferencia numérica entre el LL y LP, señalando la separación de humedades en el que se encuentra un estado plástico tal como lo clasifican los ensayos [21].

TABLA I.

CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN ÍNDICE DE PLASTICIDAD

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

Fuente: Extraído del Manual de suelos y pavimentos [18].

Capacidad de absorción: es una propiedad presente en ciertos tipos de arcillas y se relaciona directamente con aspectos como la porosidad y la superficie específica del material. La absorción ocurre principalmente en los espacios interlaminares que conforman la estructura de la arcilla, donde pueden alojarse diversas moléculas [22].

Propiedades mecánicas del suelo

Estabilidad volumétrica: se refiere a la habilidad del suelo para conservar su forma y volumen frente a variaciones en su contenido de agua. En particular suelos arcillosos son propensos a contraerse al secarse y a expandirse al mojarse, lo que puede resultar en problemas como agrietamiento o hinchamiento del suelo. Para evaluar la estabilidad volumétrica de un suelo, se realizan pruebas en laboratorio para determinar su capacidad de expansión y contracción en diferentes condiciones de humedad [19].

Humedad óptima: Porcentaje de humedad al que los suelos, al ser compactados con una energía específica, alcanzan su densidad máxima. Por otro lado, este procedimiento busca determinar la óptima humedad para realizar la compactación correctamente [23].

Máxima densidad compactada seca: Se refiere al mayor valor de densidad que un suelo puede alcanzar cuando son compactados a la humedad óptima [23].

Índice CBR: Se trata de una propiedad que se expresa en forma de porcentaje y refleja la relación entre la presión necesaria para que un pistón de 55 mm de diámetro penetre una muestra de suelo previamente compactado, colocada dentro de un molde cilíndrico de acero. Esta penetración se realiza a una velocidad constante de 1,27 mm por minuto, hasta alcanzar una profundidad de 12,7 mm. Los resultados obtenidos se comparan con los de un material de referencia, específicamente un material triturado al que se le asigna un valor estándar del 100%, lo que permite establecer una comparación en condiciones similares de ensayo. [23].

Una vez determinado el valor del CBR, se utiliza para clasificar el suelo dentro de distintas categorías de subrasante, las cuales se presentan en la TABLA II:

TABLA II.
CATEGORÍAS DE SUBRASANTE

Categorías de Sub rasante	CBR
S ₀ : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: Extraído del Manual de suelos y pavimentos [18].

Penetración dinámica: esta propiedad se evalúa a través de impactos en el terreno natural o en suelos de fundación levemente cementados. El método utilizado es el DPC, cuyo método permite medir su capacidad estructural del suelo de fundación en su estado natural [24].

Subrasante: corresponde a la capa inferior sobre la que se construye el pavimento, y constituye el nivel final en el proceso de movimientos de tierras. Todo el pavimento descansa sobre esta superficie, los materiales ubicados hasta una profundidad mínima de 60 centímetros por debajo de las subrasantes deben presentar condiciones adecuadas de estabilidad y contar con un índice de soporte igual o superior al 6%, de acuerdo con los lineamientos de MTC (2014) [18].

Las subrasantes deben de poseer determinadas características que garanticen un correcto rendimiento de las vías, así como su durabilidad:

- **Composición:** Debe estar compuesta por diferentes materiales granulares, los cuales se someterán a ciertos análisis de sus propiedades para asegurar un adecuado funcionamiento, conforme a los parámetros establecidos por las normas de diseño de carreteras [25].
- **Estabilidad:** Característica muy crucial que debe ofrecer la rasante en las vías de tránsito, dado que proviene de posibles fallas y deformaciones. Es por eso, que se realiza un análisis de la composición del suelo y ejecutar el tratamiento indicado según las normativas actuales de carreteras [25].

- Capacidad de soporte: Es la capacidad de resistencia que brinda la subrasante para un óptimo rendimiento, el cual se mide por medio del CBR. Asimismo, debe de seguir los parámetros mínimos establecidos por la normativa correspondiente [25].

Estabilización de suelos

Según lo indicado en el capítulo IX del MTC (2014), este proceso consiste en mejorar las características físicas y mecánicas del suelo mediante el uso de técnicas mecánicas y la incorporación de compuestos químicos, ya sean de origen natural o sintéticos. Existen otros métodos, como la adición de uno o más materiales estabilizadores o la sustitución del suelo [18]. Reducir la flexibilidad del suelo, reforzarlo, mejorar su trabajabilidad y aumentar su estabilidad volumétrica son los objetivos de la estabilización [26].

Dentro de los tipos de estabilización tenemos lo siguiente:

- Estabilización física
 - Mediante la mezcla de distintos tipos de suelos: Este procedimiento de estabilización se basa en mezclar el suelo original con material de préstamo. Para este proceso es importante escarificar todo el terreno hasta al menos 15 cm de profundidad, luego mezclar y compactar el suelo hasta lograr la densidad y el nivel de subrasante requeridos [18].
 - Mediante el reemplazo de suelos: Este procedimiento se basa en 2 escenarios: el primero ocurre cuando la capa de material de préstamo se agrega de manera directa sobre el suelo ya existente. Luego se escarificará y compactará el terreno natural hasta una profundidad mínima de 15 cm, antes de agregar el material de préstamo. La segunda indica el reemplazar todo el suelo por un material de mejor calidad, donde se retirará el suelo hasta la profundidad especificada en el estudio [18].
- Estabilización química: este proceso se tiene en cuenta las reacciones químicas, al intercambiar el iónico y la cementación entre cada partícula suelo-aditivo, buscan incrementar su resistencia, estabilidad volumétrica y trabajabilidad, siendo principalmente optimizados con este tipo de estabilización los suelos arcillosos y limosos [18].

Ceniza volcánica

Su composición es generada por la fragmentación de rocas durante las erupciones y tiene un diámetro menor a 2 mm. Este material suele estar caliente cerca del volcán y se enfría a medida que se aleja. Su aspecto puede variar según el tipo de volcán y el modo de erupción, presentando tonalidades como el gris claro hasta el negro, y en cuanto al tamaño varía en granos de arena hasta un polvo fino similar al talco [27].

Propiedades y características de las cenizas volcánicas

Composición: su composición de la ceniza influye en sus propiedades físicas y en cómo interactúa con el agua y el magma en el conducto del volcán o en el borde del cráter [28].

Albedo: este término se refiere a la proporción de radiación solar que una superficie puede reflejar. En el caso de la ceniza volcánica, su capacidad reflectiva es notablemente alta, alcanzando valores de albedo cercanos al 7% bajo condiciones normales, lo que la hace considerablemente más reflectante que otros materiales [28].

Tamaño de la partícula: su tamaño está vinculado con la intensidad de la erupción volcánica, y su dispersión puede alcanzar distancias considerablemente largas, determinadas por la dirección y el tamaño de las partículas, así como por la fuerza y dirección del viento [28].

Composición química de la ceniza volcánica: Investigaciones realizadas en volcanes del sur del país, como el Misti, el Sabancaya y el Ubinas, han revelado que, a pesar de sus diferentes orígenes, las cenizas presentan composiciones químicas muy parecidas. Entre sus componentes principales se encuentran elevadas concentraciones de SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , CaO [8].

Clasificación

Las cenizas de grano fino, también llamadas cenizas volantes, se agrupan en 3 categorías de acuerdo con la norma ASTM C 618 y estas categorías se basa en los elementos químicos presentes en las cenizas:

- Clase N: Se consideran puzolanas naturales aquellas que son calcinadas como las que no lo son, teniendo en cuenta ciertos tipos de tierras diatomáceas, tobas, cenizas volcánicas y pumitas, ya sean calcinadas o no [29].

- Clase F: La ceniza volante presenta características puzolánicas que reaccionan de manera lenta con la cal y los álcalis. Su composición está conformada mayormente por óxido de silicio, aluminio y hierro. Por último, pueden contener también óxido de calcio en cantidades mínimas al 10% [29].
- Clase C: Esta categoría presenta características puzolánicas y cementicias, que reaccionan para formar aluminato cálcico hidratado y estringita. Respecto a los componentes químicos, suelen presentarse más del 30% de óxido de calcio y niveles altos de óxido de azufre [29].

TABLA III.
REQUISITOS QUÍMICOS

	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO ₂) más óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) más óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), mín., %	70,0	50,0	50,0
Óxido de calcio (CaO), %	solo informar	18,0 máx.	< 18,0
Trióxido de azufre (SO ₃), máx., %	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad, máx., %	3,0	3,0	3,0
Pérdida en ignición, máx., %	10,0	6,0 ^A	6,0

^A El uso de puzolana de Clase F que contenga hasta un 12,0 % de pérdida en ignición puede ser aprobado por el usuario si están disponibles registros de desempeño aceptable o resultados de pruebas de laboratorio.

Fuente: Extraído de la norma ASTM C 618 [29]

No obstante, al momento que las cenizas hacen contacto con el agua, se intensifican procesos como el intercambio de cationes, así como la floculación y aglomeración del Ca (OH)₂ con compuestos como el SiO₂ y Al₂O₃, lo cual da lugar a la formación de hidrosilicatos de calcio. Estos productos presentan una estructura con poros y capas texturizadas, lo que genera un aumento en la energía. El proceso se inicia con la intervención del ion calcio, formando una capa de hidrosilicato de calcio hidratado, bajo condiciones de presión crecientes, puede estallar, creando formas tubulares que irradian el grano de sílice y generan partículas de mayor diámetro. Este incremento en el diámetro de las partículas mejora la ficción entre ellas, lo que provoca la reduciendo del LL y, como consecuencia, un aumentando en la resistencia al corte, lo que justifica el incremento del CBR [30].

BASES LEGALES

Ensayos físicos

Análisis granulométrico por medio del hidrómetro MTC E – 109 [31].

Este ensayo se emplea para identificar como se distribuyen las partículas de suelo de tamaño muy fino, particularmente aquellas que tienen un diámetro inferior a 0.075 mm (tamiz N°200). Los equipos que se requieren son: balanzas, tamices, aparato agitador, el hidrómetro que este debe estar graduado [31].

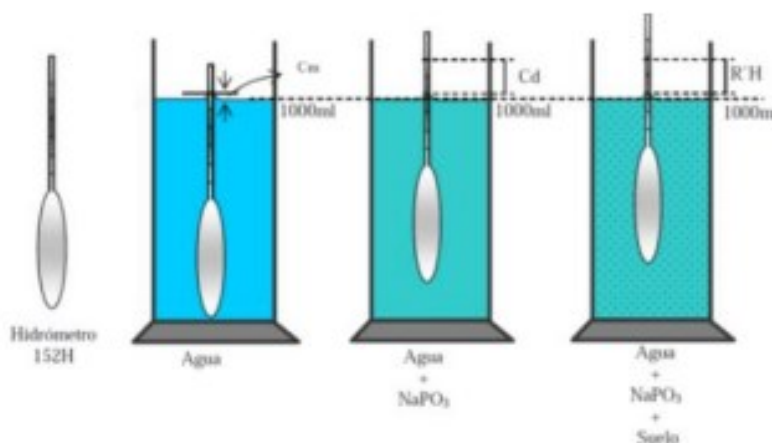


Fig. 4. Ensayo de hidrometría en laboratorio

La cantidad de muestra necesaria para realizar el análisis por hidrómetro depende de la naturaleza del suelo. Para suelos arenosos se requiere entre 75 y 100 g de muestra seca, mientras que para suelos de tipo limos o arcilloso, la cantidad necesaria varía entre 50 y 60 g (en peso seco) [31].

Equipos de laboratorio

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Tamices de N° 10.
- Probetas graduadas con capacidad de 1 litro.
- Hidrómetro
- Cronómetro
- Horno de temperatura constante de 100 ± 5 °C.
- Solución de hexametáfosfato de sodio.

Procedimiento

El procedimiento que se realiza es pesar los 50 gramos de muestra seca, a esta muestra se debe agregar 10 gramos de hexametáfosfato de sodio. Luego, la muestra se traslada a un recipiente que contiene 250 ml de agua destilada, donde debe ser agitada durante un período de 5 a 10 minutos. Una vez homogenizada, se vierte en cilindros graduados con un volumen total de 1 litro de agua destilada, iniciando inmediatamente las lecturas a intervalos de tiempo establecidos, que van desde el primer minuto hasta alcanzar los 1440 minutos.[31].

Determinación del contenido de humedad del suelo MTC E – 108 [31]

Es necesario someter una muestra de suelo húmedo a un proceso de secado completo, para esto se necesita un horno a 110 ± 5 °C, la prueba determina la totalidad de agua que es eliminada.

Para obtener el peso de los sólidos, se pesa la muestra una vez que ha sido secada completamente en el horno; el peso del agua se determina pesando la tierra que se pierde durante el proceso de secado. Para llevar a cabo esta prueba, las herramientas necesarias incluyen un horno de secado y balanzas que puedan detectar cambios inferiores a 0,01 gramos. Para los materiales, se utilizan recipientes adecuados y, en determinadas situaciones, también puede emplearse un desecador [31].

El procedimiento para determinar el contenido de humedad inicia con el pesado de un recipiente limpio y completamente seco junto con su tapa, se procede, elegir muestras representativas, añadir una muestra húmeda al recipiente y calcular el peso combinado del material húmedo y el recipiente. A continuación, secar el material a 110 ± 5 °C en un horno hasta que su peso se mantenga constante. Para obtener el peso final, se pesa una vez más el recipiente que contiene el material seco después de enfriarlo [31].

Los cálculos se realizan mediante las siguientes expresiones.

$$W = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} * 100$$

$$W = \frac{W_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} * 100 = \frac{W_W}{M_S} * 100$$

Donde:

W	=	es el contenido de humedad, (%)
M_{CWS}	=	es el peso del contenedor más el suelo húmedo, en gramos
M_{CS}	=	es el peso del contenedor más el suelo secado en horno, en gramos
M_C	=	es el peso del contenedor, en gramos
M_w	=	es el peso del agua, en gramos
M_s	=	es el peso de las partículas sólidas, en gramos

Determinación del límite líquido de los suelos MTC E – 110 [31].

Esta prueba es determina la humedad a la que, en condiciones específicas y reguladas, una tierra pasa de semisólida a líquida. Mediante golpes en la copa Casagrande, el límite líquido se determina combinando primero un poco de tierra con agua en un recipiente designado. El MTC E 110 especifica las herramientas y suministros necesarios para realizar esta prueba, incluidos los recipientes de almacenamiento: un tarro de porcelana de 115 mm, un aparato de límite líquido, también conocido como Casagrande, balanzas de precisión y un horno con termostato que puede mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ para secar la muestra [31].

Equipos y materiales

- Copa de Casagrande
- Acanalador
- Calibrador
- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante de $100 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Espátula
- Agua destilada
- Recipientes de acero (taras)

Procedimiento

En cuanto al proceso Primero se debe tener una muestra que debe estar tamizada por la malla N°40, luego se homogeneiza con agua destilada, esta muestra se debe dejar reposar por 24 horas. Una vez pasado el tiempo se procede a realizar el ensayo en la copa Casagrande. Se debe acomodar la mezcla en el recipiente y con ayuda del ranurador se procede hacer una ranura, esta no debe ser mayor a los 10 mm. Posteriormente se debe accionar la copa Casagrande con un promedio de 2 golpes por segundo hasta que la ranura empiece a cerrar, dependiendo del

número de golpes 25-35, 20-30, 15-25, se procede a extraer una porción de la muestra y se coloca en la tara omitiendo el peso de esta, finalmente se coloca en el horno. Teniendo la muestra seca se realiza el mismo procedimiento de pesado sin tener en cuenta el peso de la tara [31].

Se deben tener en cuenta las siguientes ecuaciones proporcionadas por el manual.

$$LL = W^n \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{o} \quad LL = kW^n$$

Donde:

- N = Números de golpes requeridos para cerrar la ranura para el contenido de humedad,
 Wⁿ = Contenido de humedad del suelo,
 K = factor dado en la tabla A.1

TABLA IV.
FACTOR “K” PARA EL LÍMITE LÍQUIDO

Tabla A -1

N (Numero de golpes)	K (Factor para límite líquido)
20	0,974
21	0,979
22	0,985
23	0,990
24	0,995
25	1,000
26	1,005
27	1,009
28	1,014
29	1,018
30	1,022

Fuente: Extraído de [31].

Determinación del límite plástico de los suelos MTC E – 111 [31].

El límite plástico (L.P.) se define como el contenido mínimo de humedad con el cual es posible moldear pequeñas barras de suelo de aproximadamente 3,2 mm de diámetro, este procedimiento se realiza utilizando la palma de la mano, haciendo rodar el material sobre una superficie de vidrio lisa [31].

Equipos y materiales

- Copa de Casagrande
- Acanalador
- Calibrador

- Balanza con precisión de 0.01 g.
- Horno de temperatura constante de 100 ± 5 °C.
- Base de vidrio
- Espátula
- Agua destilada
- Recipientes de acero (taras)

Procedimiento

De la misma muestra que se realiza el ensayo de límite líquido, se toma una porción de suelo de entre 1,5 a 2 gramos, posteriormente se empieza a moldear con ayuda de la palma de la mano sobre la superficie de vidrio, este proceso se debe realizar a una presión constante hasta lograr obtener rollos de 3 mm de diámetro, finalmente se pesa los rollos húmedos para colocarlo al horno hasta que seque y del mismo modo se procede a pesar [31].

Para calcular el (LP), debemos tener en cuenta la siguiente ecuación que está medida en porcentaje de humedad.

$$\textit{Limite Plastico} = \frac{\textit{Peso de agua}}{\textit{Peso de suelo secado al horno}} * 100$$

El índice de plasticidad es la diferencia entre (L.L.) y e (L.P.)

$$\textit{Indice de Plasticidad} = \textit{L. Liquido} - \textit{L. Plastico}$$

Gravedad específica de los sólidos del suelo mediante picnómetro de agua MTC E 113

Utilizando un picnómetro con agua, este ensayo permite calcular la densidad de las partículas sólidas presentes en una muestra de suelo, además de establecer el nivel de saturación y el porcentaje de vacíos en la estructura del mismo. Además, para realizar este ensayo se debe contar con algunos equipos como, picnómetro, secador, horno para el secado de las muestras, y las balanzas de precisión [31].

El procedimiento comienza pesando el picnómetro limpio y completamente seco con una balanza de precisión de aproximadamente 0,01 g. A continuación, se vuelve a pesar el picnómetro después de haberlo llenado con agua desairada hasta la marca de calibración.

Después, se prepara una mezcla de suelo con aproximadamente 100 mililitros de agua y, utilizando un embudo de boca lisa, se introduce cuidadosamente esta mezcla en el picnómetro.

Para remover la pasta de tierra empapada, agítela. Si se utiliza agitación o calor, deben emplearse durante un mínimo de dos horas. A continuación, se mide la temperatura y se pesa el picnómetro con la mezcla de pasta hasta la marca de calibración. Por último, se utiliza un horno para pesar la muestra seca con el fin de conseguir una muestra totalmente seca [31].

Ensayos mecánicos

Compactación del suelo en laboratorio utilizando energía modificada (Proctor modificado) MTC E 115 [31].

Esta prueba de laboratorio se utiliza para entender cómo cambia la densidad del suelo cuando varía su humedad. El procedimiento consiste en compactar el suelo dentro de un molde metálico de 4 o 6 pulgadas de diámetro (equivalente a 101,6 mm o 152,4 mm), usando un pisón de 10 libras (44,5 N) que se deja caer desde una altura de 457 mm. Para asegurar una compactación uniforme, el suelo se coloca en cinco capas, y a cada una se le dan 25 golpes repartidos de forma pareja. Gracias a este ensayo, se puede conocer la humedad ideal que permite obtener la mayor densidad del suelo, algo fundamental al momento de diseñar y construir sobre él. [31].

Instrumentación y materiales utilizados

- Molde cilíndrico de 6"
- Martillo de Proctor
- Balanza
- Tamiz N° 4
- Enrazador metálico
- Cucharón

Muestra

Para realizar la selección de la muestra, se utiliza únicamente el material que logra atravesar el tamiz N° 4, para este es necesario contar con 16 kg aproximadamente, divididas en 4 porciones iguales que serán saturadas de acuerdo con la humedad previamente calculada.

Procedimiento

Al escoger las muestras para ser humedecidas, se considera que en cada punto el contenido de humedad varíe en aproximadamente un 2% y que no supere el 4%. Una vez saturadas, se dejan reposar hasta alcanzar la saturación máxima. Luego, se extrae la humedad de cada punto, se pesan y se colocan en el horno. Después, se realiza la compactación, retirando el collar del molde en la última capa y nivelando el suelo compactado. Seguidamente, se pesa el molde con el suelo compactado. Finalmente, el material es removido y se sigue el mismo procedimiento para las demás muestras.

CBR de los suelos en laboratorio MTC E 132

La finalidad principal de este ensayo es evaluar la capacidad de resistencia del suelo, en función de su contenido de humedad y su nivel de compactación. Este ensayo es utilizado en subrasantes, base, subbase y afirmado de un pavimento, ya que sus resultados varían según el grado de compactación y el porcentaje de humedad presente en el suelo [31].

Instrumentación y materiales utilizados

- Molde cilíndrico
- Pisón para compactar
- Pesas con orificio central
- Prensa de penetración
- Disco espaciador de metal
- Dial
- Pistón de sección transversal circular
- Balanza
- Enrazador metálico
- Cucharón
- Tanque para inmersión de los moldes

Procedimiento

El procedimiento se inicia determinando el nivel de humedad presente en el suelo, lo cual se realiza en laboratorio a través del secado en horno. Después, se prepara el molde con sus componentes y se añade agua para obtener el nivel de humedad adecuado. Para cada nivel de compactación, se utiliza una muestra de 5000 g, con partes extraídas antes y después de la inmersión. Tras la compactación, se desmonta el molde, se le quita el cuello y se vuelve a montar invertido utilizando papel de filtro. Tras aplicar una sobrecarga sumergiendo la muestra en anillos, se observa la primera expansión y se deja la muestra sumergida durante cuatro días. A continuación, se vacía, se pesa y se realiza la prueba de penetración con una sobrecarga mínima, se ajustan los diales y se aplica la carga al pistón a una velocidad predeterminada [31].

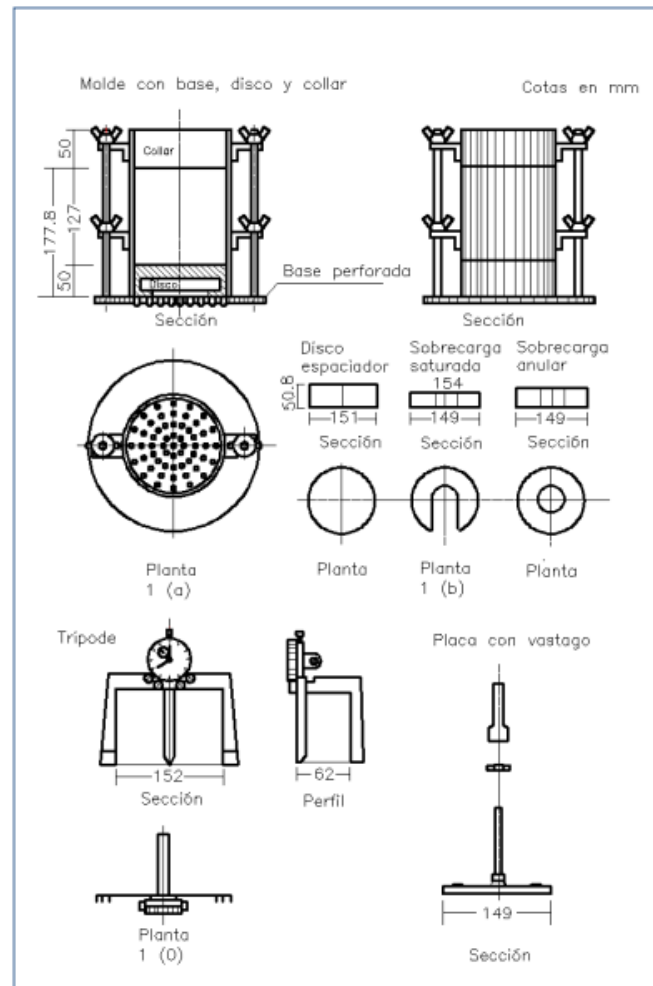


Fig. 5. Equipo de CBR [26]

Ensayo de penómetro dinámico de cono – ASTM D 6951

El objetivo fundamental de este ensayo es evaluar la resistencia in situ de suelos, tanto en materiales compactados como en su estado natural. Se emplea un penetrómetro dinámico de cono (DCP) de 8 kg, es utilizado para estimar el CBR, así como determinar el espesor de las capas del terreno y su resistencia al corte, entre otros parámetros relevantes. [33].

Equipos y materiales

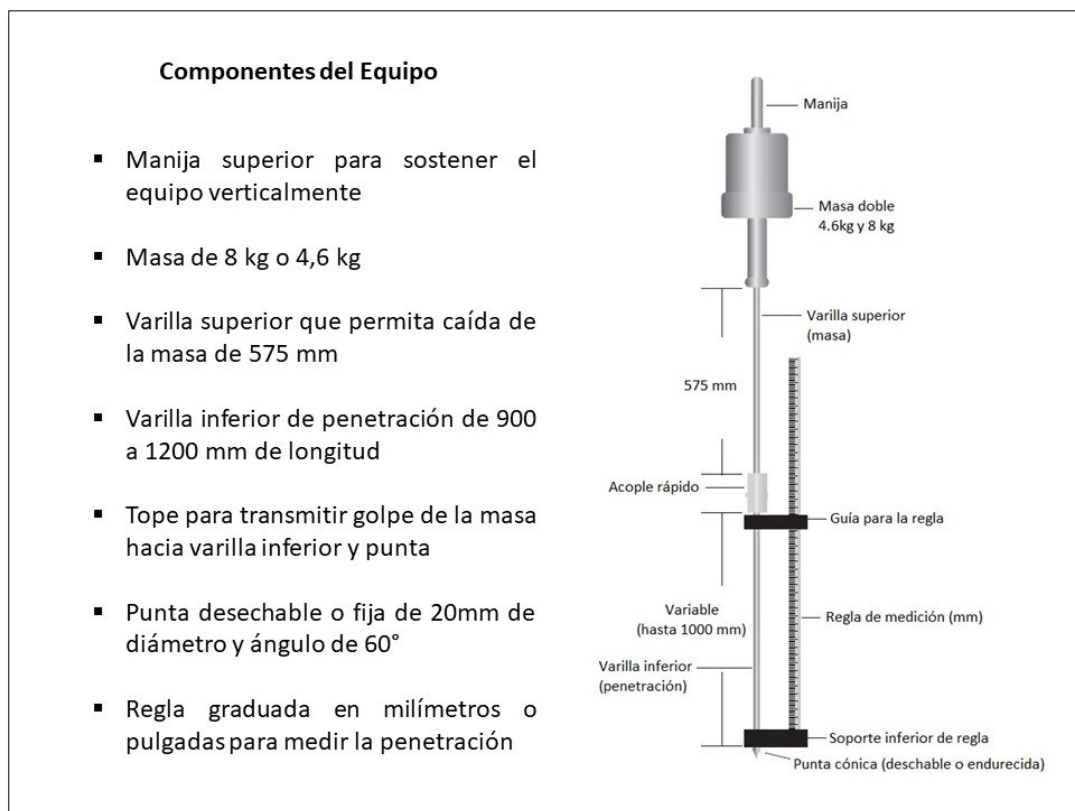


Fig. 6. Componentes del equipo [34].

Procedimiento

Se requiere la participación de tres personas para la ejecución del procedimiento: el primero se encarga de mantener el equipo en posición vertical y estable; el segundo realiza los impactos con el martillo; y el último se dedica a observar y registrar las mediciones obtenidas durante el ensayo. [35].

- Primero se ubica el sitio donde se realizará el ensayo, asegurándose de que el equipo se coloque en posición vertical sobre una superficie nivelada y libre de piedras u otros obstáculos que puedan interferir con la realización del procedimiento.
- Se introduce el cono asentándose a 2” hasta el fondo para asegurar que se encuentre muy bien confinado.
- El procedimiento del golpe con el martillo es levantar hasta la parte superior del eje de recorrido y dejar caer, no se debe golpear la parte superior y tampoco dar un impulso al martillo hacia la parte inferior.
- Por último, se tiene en cuenta que en los formatos de anotaciones de cada medida de penetración se debe indicar la profundidad de rechazo del equipo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de investigación

Tomando como referencia al artículo “Métodos y estrategias de la investigación Científica” [36], en esta investigación se plantea la investigación aplicada, puesto que se tiene una problemática real, que la solución se presenta en esta investigación, para ello se ha desarrollado hipótesis que puedan generar soluciones. Se utilizó una metodología experimental para obtener datos reales mediante la experimentación de la hipótesis, utilizando variables. La recolección de datos será de forma cuantitativa ya que se va a emplear procedimientos de laboratorio.

Nivel de investigación

El enfoque de esta investigación es de tipo descriptivo, ya que se detallan las características, ensayos que estos se tienen que desarrollar conforme a lo especificado en las normativas correspondientes.

Diseño de investigación

La metodología utilizada en este estudio se considera experimental, ya que busca resolver el problema al manipular la variable dependiente mediante pruebas en laboratorio. Se enfoca en comparar unidades según sus características y propiedades para llegar a conclusiones que ayuden a solucionar la hipótesis planteada.

Población, muestra y muestreo

Población

Teniendo en cuenta [37], es el conjunto que se estudiará en el estudio, el cual abarca la población de interés. Se recopilarán todos los datos correspondientes de este grupo con el fin de poder lograr conclusiones que ayuden a resolver la problemática presentada.

En el presente proyecto la población abarca todos los suelos arcillosos expansivos existentes en las vías de circulación de La Victoria, teniendo en cuenta la información proporcionada por SIGRID, las cuales tienen presencia de suelo con alta expansión [38].

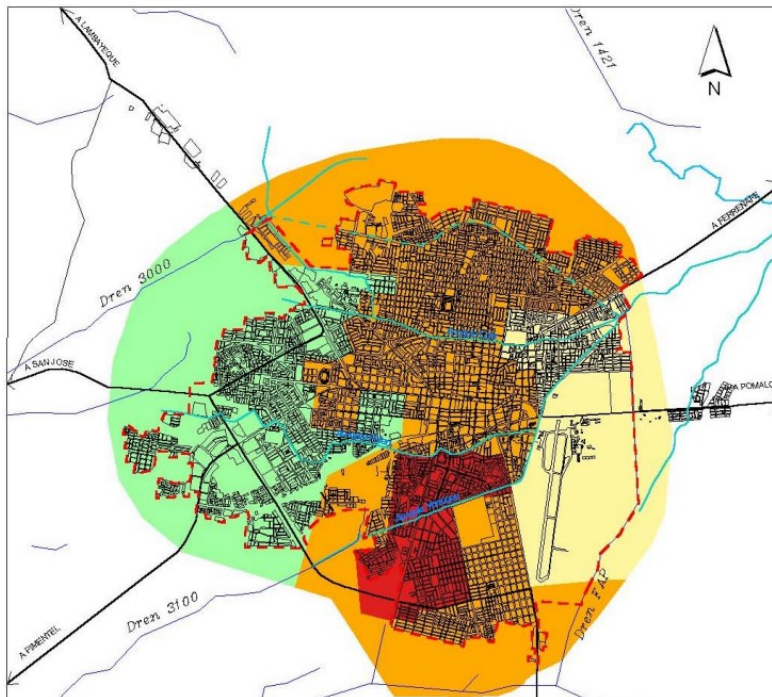


Fig. 7. Mapa geotécnico de Chiclayo

Muestra

Según [39], la muestra es un subgrupo que presenta características iguales que la población. No obstante, los datos que se logren obtener se extraerán de esta muestra teniendo en cuenta la situación problemática estudiada.

En este caso, el área de estudio presenta una muestra representativa teniendo en cuenta los suelos presentes en ciertas partes de la Urb. Santa Margarita con extensión hasta la Panamericana.

Muestreo de estudio

El muestreo no probabilístico es aquel donde se selecciona las unidades que serán estudiadas y observadas teniendo en cuenta el criterio seleccionado por el investigador. El muestreo intencional que pertenece a una de las clasificaciones del muestreo no probabilístico, es aquel que sigue criterios personales. Asimismo, al seleccionar este tipo de muestreo no se puede aplicar ningún método estadístico, de igual manera no todos los que pertenecen a la población presentan las mismas posibilidades de ser seleccionados [39].

En este proyecto se optó por un muestreo no probabilístico, empleando específicamente el método de muestreo intencional. A continuación, se describen los criterios aplicados para determinar la cantidad de calicatas, porcentajes de adición de cenizas volcánicas el número de ensayos que se llevarán a cabo son:

Criterios para la cantidad de calicatas y porcentajes de adición de las cenizas volcánicas

La selección de la profundidad y la cantidad de calicatas se basó en la TABLA V, considerando además estudios anteriores que se detallan a continuación:

**TABLA V.
CRITERIO PARA SELECCIONAR LA CANTIDAD DE CALICATAS Y
PROFUNDIDAD**

Estudios previos	Cantidad de calicatas
Estabilización de arcillas expansivas con ceniza volcánica y ceniza de casca rilla de arroz	Realizaron un total de 3 calicatas, profundidad de 1.5 m
Evaluación de cenizas volantes de lignito para estabilizar subrasantes arcillosas expansivas: una solución sostenible para la construcción de pavimentos	Realizaron 2 calicatas, profundidad de 1.5 m
Aplicación de cenizas volantes de carbón en la estabilización de subrasantes de pavimentos: una revisión	Realizaron 3 calicatas, profundidad de 1.5 m
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	Realizaron 4 calicatas, profundidad de 1.5m
Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho	Realizaron 4 calicatas, profundidad de 1.5m
Estabilización de suelos arcillosos adicionando ceniza de ladrillo en vías no pavimentadas	Realizaron 3 calicatas, profundidad de 1.5 m

Teniendo en cuenta la TABLA V, se realizaron 5 calicatas, lo que brindó una representación correcta de las características del suelo en el área de estudio. Esta profundidad de 1.5 m es crucial, ya que se ha determinado que en este rango se manifiestan las propiedades más relevantes de las arcillas expansivas, incluyendo la actividad de hinchamiento y contracción.

Por otro lado, en cuanto al criterio de **selección de los porcentajes** de adición del material estabilizante se planteó de acuerdo con una revisión bibliográfica previa, además de la opinión de expertos.

TABLA VI.
CRITERIO DE SELECCIÓN DE PORCENTAJES

Estudios previos	Recomendaciones	Óptimo
Estabilización de arcillas expansivas con ceniza volcánica y ceniza de cascara de arroz	Porcentajes de 10, 20 y 30% en ambas. Se recomienda evaluar que resultados se obtienen si solo se evalúa un tipo de ceniza a cualquier tipo de suelo, bien puede mejorar o disminuir su resistencia.	20%
Evaluación de cenizas volantes de lignito para estabilizar subrasantes arcillosas expansivas: una solución sostenible para la construcción de pavimentos	1%, 2%, 3%, 4% y 5%. Recomiendan evaluar otro tipos de suelos al agregar cenizas volantes y ver que características presentan, dado que no toda área de estudio puede presentar las mismas circunstancias y condiciones climáticas.	5%
Aplicación de cenizas volantes de carbón en la estabilización de subrasantes de pavimentos: una revisión	Porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20%: Recomendaron evaluar más a fondo estos porcentajes en otros tipos de suelos con el fin de determinar el óptimo con mas pruebas de ensayos y no solo basarse en una repetición.	15%
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	Porcentajes de 15%, 20% y 25%: profundizar los estudios sobre este tipo de cenizas en otros áreas de estudios ya que se pueden presentar circunstancias y condiciones climáticas distintas.	25%
Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho	Porcentajes de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%: Evaluar estos tipos de suelos en los mismos porcentajes pero con otros tipos de cenizas.	20%
Estabilización de suelos arcillosos adicionando ceniza de ladrillo en vías no pavimentadas	Porcentajes del 10%, 20%, 30%,: recomendaron estudiar porcentajes de adición en áreas de estudios diferentes en porcentajes similares para ver que comportamiento tienen a otro tipo de suelos.	30%

Teniendo en cuenta la TABLA VI se establece que los porcentajes de reemplazo del aditivo estabilizador, en este caso la ceniza volcánica, serán del 5%, 10%, 15%, 20% y 30% en peso respecto al material a estabilizar. Se eligió comenzar con el 5%, ya que nos permitió observar de manera más precisa los efectos iniciales de las cenizas volcánicas en las propiedades de las arcillas expansivas.

Esta selección se basa en la premisa de que los porcentajes menores pueden revelar cambios importantes en las propiedades de las arcillas antes de pasar a proporciones más elevadas. Además, al seleccionar estos rangos se estableció un marco escalonado que brinde la comparación con otros estudios que han utilizado porcentajes similares, ya que bien con este tipo de cenizas se pueden obtener mejores resultados como resultados menores a los ya mencionados en los estudios.

Si bien es cierto que algunos estudios comienzan con dosificaciones altas, mi enfoque permite una evaluación detallada de cómo este tipo de cenizas impactan el suelo en sus etapas iniciales, siendo importante para comprender la relación entre la cantidad de ceniza y la mejora en sus propiedades.

La inclusión de estos porcentajes permitirá evaluar cómo la ceniza volcánica influye en la estabilización de las arcillas expansivas, contribuyendo a una mejora en la capacidad portante y reduciendo la plasticidad del suelo. Además, se facilitará la identificación del porcentaje óptimo que proporcionará las características más adecuadas para su uso como subrasante, asegurando la durabilidad y estabilidad de las construcciones en esta región.

Criterio de selección para la cantidad de repeticiones por ensayo.

Para determinar el porcentaje óptimo, primero se llevó a cabo la ejecución de 5 calicatas donde se seleccionó conservar 3 muestras, estas son las que presentan una densidad menor, además de que su capacidad de soporte esté por debajo del 6% que es lo que nos especifica la normativa. Esta selección asegura que los ensayos se realicen sobre muestras que representen las condiciones más críticas del material, observado en la TABLA VII:

TABLA VII.
ENSAYOS PARA SUELO EN ESTADO NATURAL

MUESTRAS DE SUELO DE ESTADO NATURAL	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05
CONTENIDO DE HUMEDAD	1	1	1	1	1
LÍMITE LÍQUIDO	1	1	1	1	1
LÍMITE PLÁSTICO	1	1	1	1	1
GRANULOMETRÍA POR SEDIMENTACIÓN	1	1	1	1	1
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1	1	1	1	1
PROCOTOR MODIFICADO	1	1	1	1	1
CBR	1	1	1	1	1
TOTAL	7	7	7	7	7
TOTAL DE MUESTRAS	35				

Teniendo estudios previos donde solo se basaron en una repetición por ensayo y teniendo en cuenta el antecedente [15], se tuvo lo siguiente:

Una vez descartadas las 2 calicatas, se realizaron 3 y 5 repeticiones en cada una de las 3 calicatas seleccionadas para los ensayos mecánicos. Esta cantidad se seleccionó para garantizar datos precisos de los resultados y disminuir la variabilidad en los datos.

En cuanto a los ensayos físicos, se realizaron dos repeticiones, ya que este número se considera adecuado para obtener una estimación confiable de las propiedades del material. Por otro lado, en los ensayos de límites se llevaron a cabo tres repeticiones, con el fin de garantizar la consistencia en la medición de los índices de plasticidad y contracción. Estos resultados se presentan en las TABLAS VIII, IX y X.

TABLA VIII.
NÚMERO DE ENSAYOS PARA C-1

MUESTRA EXPERIMENTAL CALICATA 01						
ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS	AD 0%	AD. 5%	AD. 10%	AD. 15%	AD. 20%	AD. 30%
CONTENIDO DE HUMEDAD	2	--	--	--	--	--
LÍMITE LÍQUIDO	3	3	3	3	3	3
LÍMITE PLÁSTICO	3	3	3	3	3	3
GRANULOMETRÍA POR SEDIMENTACIÓN	2	--	--	--	--	--
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2	--	--	--	--	--
ÍNDICE DE EXPANSIÓN	5	5	5	5	5	5
PROCOTOR MODIFICADO	3	3	3	3	3	3
CBR	5	5	5	5	5	5
TOTAL	25	19	19	19	19	19
TOTAL DE MUESTRAS	120					

TABLA IX.
NÚMERO DE ENSAYOS PARA C-2

MUESTRA EXPERIMENTAL CALICATA 02						
ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS	AD 0%	AD. 5%	AD. 10%	AD. 15%	AD. 20%	AD. 30%
CONTENIDO DE HUMEDAD	2	--	--	--	--	--
LÍMITE LÍQUIDO	3	3	3	3	3	3
LÍMITE PLÁSTICO	3	3	3	3	3	3
GRANULOMETRÍA POR SEDIMENTACIÓN	2	--	--	--	--	--
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2	--	--	--	--	--
ÍNDICE DE EXPANSIÓN	5	5	5	5	5	5
PROCOTOR MODIFICADO	3	3	3	3	3	3
CBR	5	5	5	5	5	5
TOTAL	25	19	19	19	19	19
TOTAL DE MUESTRAS	120					

TABLA X.
NÚMERO DE ENSAYOS PARA C-3

MUESTRA EXPERIMENTAL CALICATA 03						
ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS	AD 0%	AD. 5%	AD. 10%	AD. 15%	AD. 20%	AD. 30%
CONTENIDO DE HUMEDAD	2	--	--	--	--	--
LÍMITE LÍQUIDO	3	3	3	3	3	3
LÍMITE PLÁSTICO	3	3	3	3	3	3
GRANULOMETRÍA POR SEDIMENTACIÓN	2	--	--	--	--	--
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2	--	--	--	--	--
ÍNDICE DE EXPANSIÓN	5	5	5	5	5	5
PROCOTOR MODIFICADO	3	3	3	3	3	3
CBR	5	5	5	5	5	5
TOTAL	25	19	19	19	19	19
TOTAL DE MUESTRAS	120					

Criterio para llevar a cabo el ensayo DCP

Para este ensayo se optó por utilizar únicamente la muestra con el porcentaje óptimo de ceniza volcánica. Esta elección permitirá evaluar de manera precisa y representativa el máximo rendimiento del aditivo en condiciones reales de campo, aportando datos que validen y complementen los resultados óptimos de CBR obtenidos en laboratorio. Así, se verificará si el comportamiento en campo cumple con los criterios de soporte previstos y validar la efectividad del porcentaje óptimo que se obtenga de las cenizas volcánicas en condiciones reales.

TABLA XI.
ENSAYO DEL DCP CON EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS

Ensayos	Ensayo de Penómetro Dinámico de Cono
% Óptimo de cenizas volcánicas	1

Hipótesis

La utilización de ceniza volcánica mejora las propiedades físicas y mecánicas en arcillas expansivas para uso como subrasante.

Variables

Tabla de Operacionalización de variables

TABLA XII. VARIABLE DEPENDIENTE

VARIABLES INDEPENDIENTES				
VARIABLE	INDICADOR	UND. DE MEDIDA	RANGO DE APLICACIÓN	MÉTODO DE MEDICIÓN
Adición de ceniza volcánica	Cantidad de ceniza volcánica	% en peso	5%, 10%, 15%, 20%, 30%	BALANZA (gr)

TABLA XIII.
VARIABLE DEPENDIENTE

VARIABLES DEPENDIENTES				
VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADOR	UNI. DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN
Propiedades físico-mecánicas de suelo arcilloso expansivo para uso como subrasante	ENSAYOS FÍSICOS	Contenido de humedad	%	Determinación del contenido de humedad del suelo MTC E – 108
		Límite Líquido	%	Determinación del límite líquido de los suelos MTC E – 110
		Límite Plástico	%	Determinación del límite plástico de los suelos MTC E – 111
		Granulometría por sedimentación	mm	Análisis granulométrico por medio del hidrómetro MTC E – 109
		Gravedad específica	g/cm ³	Gravedad específica de los sólidos del suelo mediante picnómetro de agua MTC E 113
		Proctor modificado	g/m ³	Compactación del suelo en laboratorio utilizando energía modificada (Proctor modificado) MTC E 115
	ENSAYOS MECÁNICOS	CBR	%	CBR de los suelos en laboratorio MTC E 132

TABLA XIV.
VARIABLE INTERVINIENTE

VARIABLES INTERVINIENTES			
VARIABLE	INDICADOR	UND. DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN
Propiedades químicas de la ceniza volcánica	Composición química	%	Difracción de rayos x

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada empleada en el presente estudio será la observación directa, ya que implica llevar registros detallados y puntuales de cada evento observado en el proyecto, tomando apuntes de cada suceso en el momento en que ocurre [40]. Además, brinda la documentación de cada evento que ocurren durante los ensayos realizados.

TABLA XV.
TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Observación directa	Análisis de los resultados
Observación directa de la zona a estudiar, ensayos de labroaotrio	Interpretar y discutir los resultados obtenidos de cada ensayo, de igual manera al momento de realizar la comparativa de la muestra natural y la estabilizada.

Los instrumentos empleados serán los siguientes:

TABLA XVI.
INSTRUMENTOS

Instrumentos	Actividades
Equipos de laboratorio	Realizar cada ensayo establecido en la investigación
Sacos, wincha, palas, guantes de seguridad, casco y cuaderno	Extracción de las muestras de las 5 calicatas
Normativas peruanas y de otros países	Brindan detalles para realizar cada ensayo
Formato de ensayos	Registrar los datos de cada ensayo

PROCEDIMIENTO

Para iniciar la investigación, se llevó a cabo una visita preliminar al campo con el objetivo de identificar visualmente el estado de la vía, las zonas con presencia de arcillas y otros problemas en el tramo estudiado, como asentamientos en las veredas y desniveles causados por la humedad. Además, se realizó una búsqueda de información sobre el tramo seleccionado y los posibles tipos de suelo presentes, lo que permitió definir de manera conveniente los puntos de muestreo. Luego, se realizaron cinco calicatas a cielo abierto, de las cuales se extrajeron y almacenaron muestras alteradas, siguiendo las normativas establecidas MTC E-101 “Muestreo de Suelos y Rocas [23]. La extracción de calicatas se realizó cerca a la vía.



Fig. 8. Excavación calicata 01



Fig. 9. Excavación calicata 02



Fig. 10. Excavación calicata 03



Fig. 11. Excavación calicata 04



Fig. 12. Excavación calicata 05

Perfil estratigráfico de las calicatas

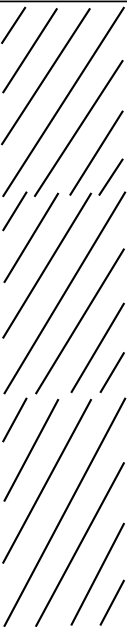
Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/AASHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0,08	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CH A-7-6 (18)	Arcilla de alta plasticidad de color oscuro No se encontró nivel freático No se presentó deslizamientos Limite liquido : 55,72% Límite plástico : 28,28% Índice de plasticidad : 27,44% Humedad natural : 24,73%
0,15					
0,23					
0,30					
0,38					
0,45					
0,53					
0,60					
0,68					
0,75					
0,83					
0,90					
0,98					
1,05					
1,13					
1,20					
1,28					
1,35					
1,43					
1,50					

Fig. 13. Perfil estratigráfico calicata 01

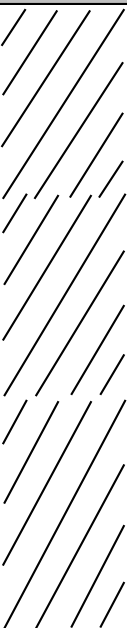
Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/AASHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0,08	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CH A-7-6 (15)	Arcilla de alta plasticidad de color oscuro No se encontró nivel freático No se presentó deslizamientos Limite liquido : 56,70% Límite plástico : 25,96% Índice de plasticidad : 30,74% Humedad natural : 21,54%
0,15					
0,23					
0,30					
0,38					
0,45					
0,53					
0,60					
0,68					
0,75					
0,83					
0,90					
0,98					
1,05					
1,13					
1,20					
1,28					
1,35					
1,43					
1,50					

Fig. 14. Perfil estratigráfico calicata 02


Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/AASHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0,08	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CL A-7-6 (16)	Arcilla de baja plasticidad de color oscuro No se encontró nivel freático No se presentó deslizamientos Limite liquido : 48,53% Límite plástico : 22,41% Índice de plasticidad : 26,12% Humedad natural : 20,75%
0,15					
0,23					
0,30					
0,38					
0,45					
0,53					
0,60					
0,68					
0,75					
0,83					
0,90					
0,98					
1,05					
1,13					
1,20					
1,28					
1,35					
1,43					
1,50					

Fig. 15. Perfil estratigráfico calicata 03

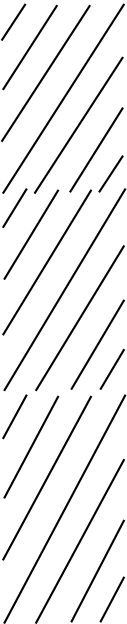
Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra N°	Símbolo	Clasificación SUCS/AASHTO	Descripción visual (IN-SITU)
0,08	A C I E L O A B I E R T O	M - 1		CL A-6 (10)	Arcilla de baja plasticidad con presencia de arena No se encontró nivel freático No se presentó deslizamientos Limite liquido : 33,15% Límite plástico : 19,21% Índice de plasticidad : 13,94% Humedad natural : 20,26%
0,15					
0,23					
0,30					
0,38					
0,45					
0,53					
0,60					
0,68					
0,75					
0,83					
0,90					
0,98					
1,05					
1,13					
1,20					
1,28					
1,35					
1,43					
1,50					

Fig. 16. Perfil estratigráfico calicata 04

Recolección de ceniza volcánica

El aditivo (ceniza volcánica) se obtuvo del volcán Sabancaya, ubicado en Sallalli, provincia de Caylloma, Arequipa. Este material se encuentra en un radio de hasta 10 kilómetros alrededor del volcán.

El volcán Sabancaya se encuentra a 80 kilómetros al noroeste de Arequipa, en el distrito de Achoma, provincia de Caylloma. La distancia entre Juliaca y el sector de Sallalli es de 281 kilómetros, y se tarda unas 4,5 horas en llegar en coche. El trayecto se divide en tres partes: de Juliaca a Pampas Cañahuas (192 km con pavimento flexible), de Pampas Cañahuas al desvío de Patapampa (58 km con pavimento flexible), y del desvío de Patapampa a Sallalli (31 km por camino de tierra).

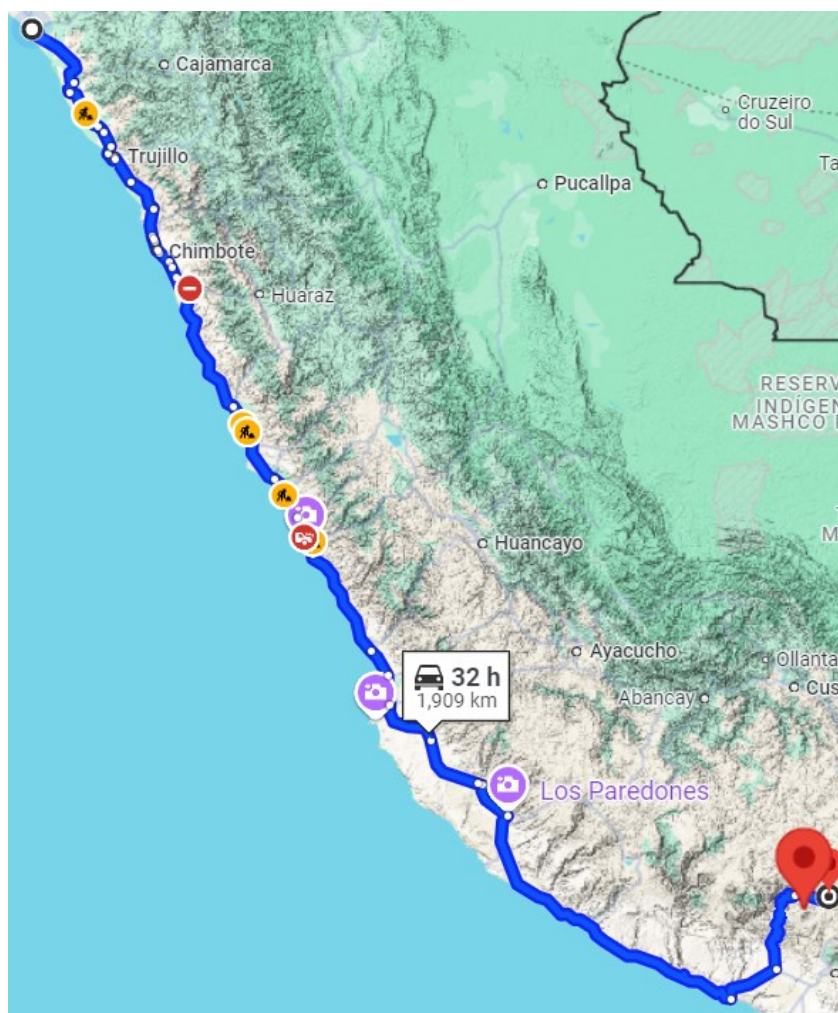


Fig. 18. Ubicación del volcán Sabancaya - Arequipa



Fig. 19. Recolección de ceniza volcánica

Para utilizar este material como aditivo, es necesario realizar un análisis químico de la ceniza volcánica. Este ensayo se llevó a cabo en el LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C., ubicado en la ciudad de Trujillo. La prueba se realizó utilizando el método de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, para lo cual se emplearon 75 mg de la muestra de ceniza, previamente tamizada con una malla 200. El procedimiento siguió la norma ASTM C25 y la volumetría USAQ-ME06, con el fin de conocer sus propiedades químicas y evaluar su aporte en la mejora del suelo arcilloso.

Después de haber realizado el ensayo de Fluorescencia de Rayos X se obtuvieron los siguientes componentes químicos del aditivo.

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES RUC:20605355189

4. RESULTADOS

COMPOSICION QUIMICA	UNIDADES	RESULTADOS	METODO UTILIZADO
SILICIO (SiO ₂)	%	43.2	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
ALUMINIO (Al ₂ O ₃)	%	24.7	
CALCIO (CaO)	%	14.1	
SODIO (Na ₂ O)	%	12.3	
MAGNESIO (MgO)	%	8.2	
NIQUEL	ppm	190	
CROMO	ppm	65.8	
PLOMO	ppm	21.2	
HIERRO	ppm	1.9	
CINC	ppm	0.7	
COBRE	ppm	5.4	

Fig. 20. Resultados de componentes químicos de ceniza volcánica

ENSAYOS DE LABORATORIO

Métodos y procedimientos

Para llevar a cabo el desarrollo de los ensayos, estos se llevaron a cabo en los laboratorios de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, teniendo en cuenta las normas correspondientes para cada uno de los ensayos. A continuación, se presenta una lista de los ensayos realizados para cada una de las muestras.

- Contenido de humedad: MTC E 108
- Limite líquido: MTC E 110
- Limites plástico: MTC E 111
- Análisis granulométrico por medio del hidrómetro: MTC E 109
- Gravedad específica: MTC E 113
- Proctor modificado: MTC E 115
- CBR en laboratorio: MTC E 132
- Ensayo de penómetro dinámico de cono – ASTM D 6951

Procedimiento de ensayos en laboratorio

Determinación del contenido de humedad

Para realizar esta prueba, se recoge una muestra de suelo de cada calicata en su estado natural. Primero se pesa la muestra inalterada y después se introduce en un horno a 110 ± 5 °C durante 24 horas. A continuación, se vuelve a pesar la muestra.



Fig. 21. Peso de la muestra en estado natural



Fig. 22. Ensayo contenido de humedad

Ensayo de límites de Atterberg, límite líquido y límite plástico

Para llevar a cabo este ensayo se tomó la muestra seca que posteriormente fue triturada. Además, se tamizó por la malla N° 40 un aproximado de 150 gr para cada una de las calicatas, estas fueron saturadas con agua destilada y esta se debe dejar reposar por 24 horas.

Para la determinación de límite líquido debemos tener en cuenta el manual de materiales MTC E 110, la norma menciona que la copa de Casagrande debe estar calibrada puesto que es en donde se va a colocar una pequeña porción de la muestra saturada, luego con la ayuda del ranurador se procede a realizar una ranura a la mitad de la cuchara, seguidamente comenzamos a girar la manivela y empieza a golpear la cuchara hasta que parte de los bordes de la ranura empiecen a cerrar o pegar. La cantidad de golpes varían entre 10 a 15, 20 a 25 y de 30 a 35. Finalmente teniendo que la muestra a cerrado en cualquiera de estos 3 rangos se toma una porción y se procede a pesarla, luego debe ser colocada en el horno por 24 horas, este proceso se repite hasta obtener los 3 puntos para cada muestra.



Fig. 23. Ensayo límite líquido

Del mismo modo para el límite plástico se toma una porción de la misma muestra, para la realización de este ensayo se necesita una base de vidrio con una cara lisa y la otra áspera para que se pueda quitar más rápido la humedad, las barritas debe tener un espesor de 3 mm aproximadamente.

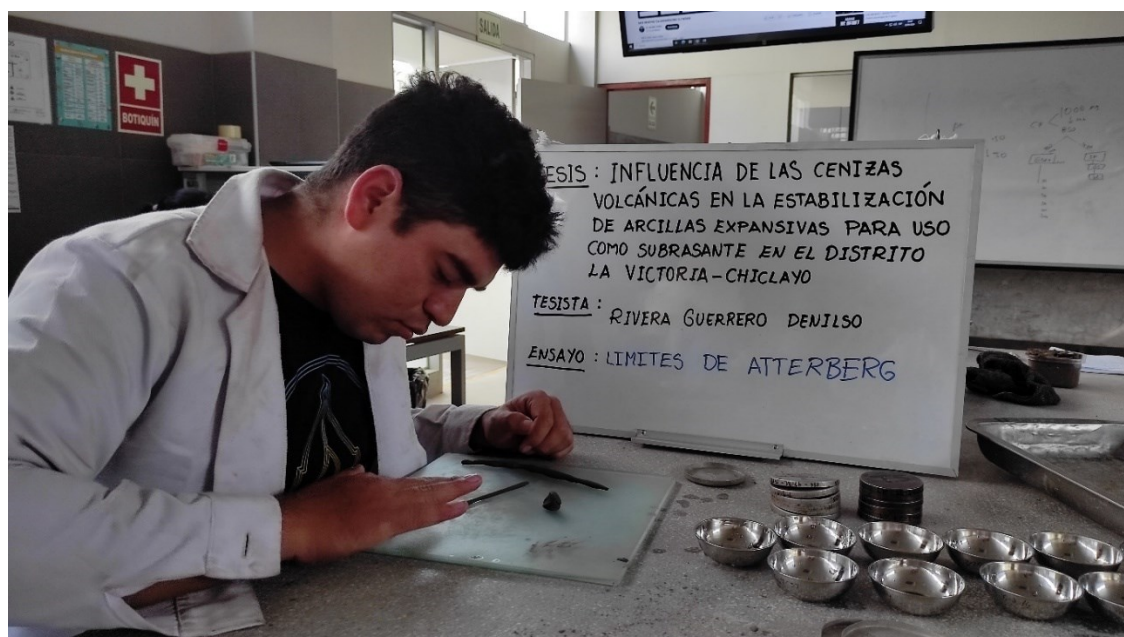


Fig. 24. Ensayo límite plástico

Análisis granulométrico por medio del hidrómetro

Este ensayo se realizó teniendo la muestra seca y triturada, posteriormente se tamizó por la malla N° 10, además también se utiliza el agente dispersante de partículas, que es la solución hexametáfosfato de sodio. Para la preparación de muestra se pesan 50 gr de suelo de cada una de las calicatas y 10 gramos de agente dispersante para cada una. En 250 ml de agua destilada se agita por 10 minutos aproximadamente hasta que las partículas se mezclen completamente, después se deja en reposo por 24 horas, el recipiente debe estar tapado.

Después de que haya pasado las 24 horas, en una probeta con capacidad de 1 litro se coloca la muestra y se rellena con agua destilada hasta su capacidad máxima, luego se agita por un minuto, y se procede a tomar lecturas con ayuda del hidrómetro cada cierto periodo de tiempo, durante 24 horas.



Fig. 26. Muestras para ensayo granulométrico por medio del hidrómetro

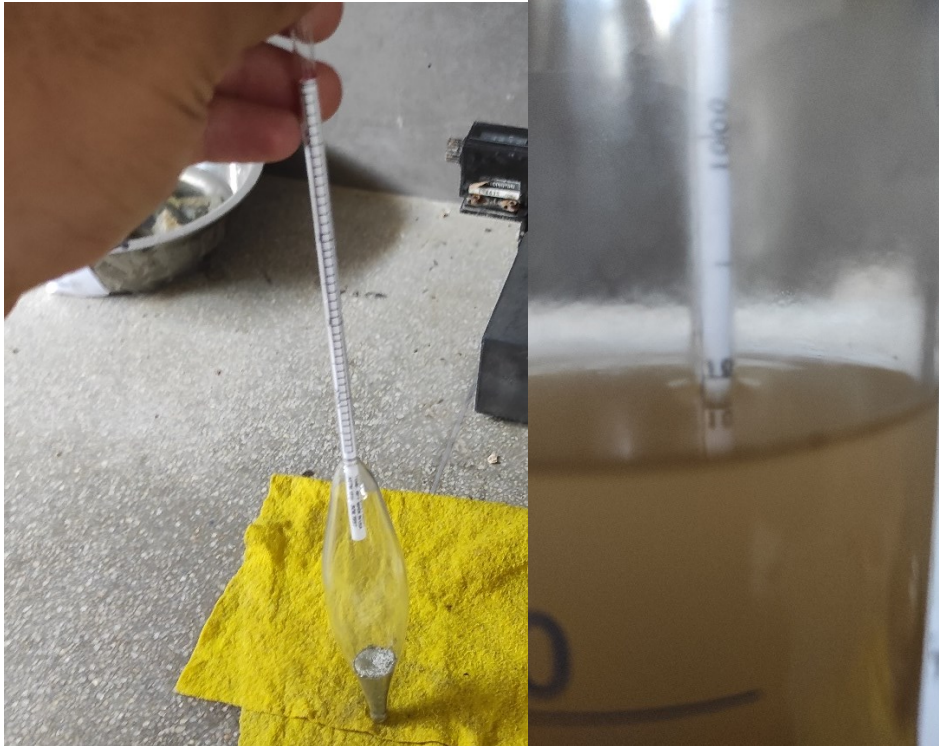


Fig. 27. Ensayo granulométrico por medio del hidrómetro

Ensayo de la Gravedad Específica Relativa a los Sólidos

Para llevar a cabo este ensayo se necesita tener la muestra seca y triturada, se procede a tamizar por la malla N° 10, después se toma 50 gramos de muestra, que debe ser colocada en una Fiola, luego se rellena con agua destilada y se procede a agitar para eliminar el aire, también se utiliza la bomba de vacíos para eliminar completamente el aire que está dentro del recipiente, después se deja en reposo por 24 horas. Finalmente se toma el peso de la Fiola junto con la muestra, además también se debe tener el peso de la Fiola solo con contenido de agua.





Fig. 28. Ensayo de gravedad específica relativa a los sólidos

Ensayo Proctor modificado

El ensayo se realizó con el método A, este consta en que el material debe ser tamizado por la malla N° 4, se necesitan por lo menos 4 puntos, cada uno será de 3 kg. Una vez que se tiene las muestras pesadas se procede a añadir agua en diferentes porcentajes, teniendo en cuenta el índice de plasticidad calculado anteriormente. Entonces primero se satura cada una de las muestras y estas se colocan en bolsas bien cerradas para evitar que se pierda la humedad.

También se debe calcular previamente el volumen y el peso del molde Proctor, luego se procede a compactar las muestras, éstas deben ser divididas en 5 capas y a cada una se le aplica 25 golpes con el martillo Proctor. Finalmente pesamos el molde más la muestra compactada, este proceso se repite para cada uno de los cuatro puntos.



Fig. 29. Ensayo de Proctor modificado

Ensayo de CBR en laboratorio

Para la llevar a cabo este ensayo, inicialmente se tuvo que calcular el porcentaje de humedad óptimo del ensayo Proctor modificado. Conociendo la humedad óptima se toma 5 kg de muestra y esta debe ser saturada, luego se deja en una bolsa por 24 horas. Además, se debe preparar los moldes, tomando las medidas para calcular su volumen y peso de cada uno.

Para cada punto del ensayo se utilizaron 5000 gramos de muestra, trabajando con tres niveles distintos de energía de compactación, aplicando 56, 25 y 12 golpes por capa, respectivamente, en cada una de las cinco capas del molde. Una vez finalizada la compactación, se retiró el collarín y se colocó el molde en posición invertida. Luego, se colocó un papel filtro en la base y se procedió a pesar el conjunto del molde con la muestra compactada. Luego se coloca en la piscina con una sobrecarga de 2.27 kg aproximadamente, con el dial se procede a tomar la medida de expansión, este proceso de medición se repite durante 96 horas, cada 24 horas, que son los días que el molde se encuentra sumergido en la piscina.

Después de haber transcurrido los 4 días, se procede a retirar el molde, y se deja escurrir el agua por un tiempo de 15 minutos aproximadamente. Luego se procede a realizar la penetración en la prensa CBR, para eso se necesita un anillo de carga dependiendo del tipo de suelo, en este caso para arcilla se utilizó el anillo de 4,5 kN. Finalmente se registran lecturas durante 10 minutos en diferentes intervalos.



Fig. 30. Preparación de material para ensayo CBR en laboratorio



Fig. 31. Ensayo CBR en laboratorio

MTC E 117 ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y PESO UNITARIO DEL SUELO INSITU MEDIANTE EL METODO DEL CONO DE ARENA

Este estudio ha sido implementado con el propósito de evaluar la eficacia de la incorporación de cenizas volcánicas en suelos arcillosos expansivos, con la finalidad de corroborar los hallazgos obtenidos en un entorno laboratorio. Este procedimiento tiene como objetivo contrastar los índices de compactación logrados en condiciones de laboratorio con los obtenidos en el lugar de estudio, facilitando así la determinación del nivel real de compactación en terreno y validando la optimización del comportamiento geotécnico del suelo tratado con el mencionado aditivo.



Fig. 32. Nivelación y compactación del tramo de prueba



Fig. 33. Densidad de campo del tramo de prueba

ENSAYO DCP ASTM D6951

Se llevó a cabo el ensayo de DCP (ASTM D6951) con el objetivo de corroborar los hallazgos de laboratorio en relación con la resistencia del suelo estabilizado con cenizas volcánicas. Este ensayo facilita la comparación entre los valores del CBR determinados en laboratorio y la capacidad portante medida en el lugar de estudio, lo que permite la evaluación del comportamiento auténtico del suelo tratado bajo condiciones de campo.



Fig. 34. Penetrómetro dinámico de cono

Cálculo de ceniza volcánica para las tres calicatas seleccionadas

Para determinar la cantidad de ceniza a agregar, se consideró el peso seco de la muestra. Es decir, en cada ensayo, la cantidad de ceniza se calculó como un porcentaje respecto al peso total seco del suelo.

A continuación, se detallan las combinaciones que se tiene para cada muestra.

TABLA XVII.
PORCENTAJES DE ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA

MUESTRA	SUELO NATURAL	CENIZA VOLCÁNICA % EN PESO	
		% ADICIÓN	CÓDIGO
M-1	100%	0%	SN+0%CV
M-2	100%	5%	SN+5%CV
M-3	100%	10%	SN+10%CV
M-4	100%	15%	SN+15%CV
M-5	100%	20%	SN+20%CV
M-6	100%	30%	SN+30%CV

La siguiente tabla muestra las cantidades de ceniza volcánica utilizadas como % de adición en varios experimentos de laboratorio, incluyendo límites Atterberg, Proctor modificado, CBR y expansión libre. Estos porcentajes se estimaron utilizando el peso seco del suelo natural, asegurando una dosis precisa y uniforme en cada ensayo. Este enfoque pretende investigar cómo reacciona el suelo cuando se añaden cantidades variadas de ceniza volcánica como estabilizante.

Los porcentajes están expresados en peso y han sido codificados para facilitar la identificación de las muestras y relacionarlas fácilmente con los ensayos realizados. Estas proporciones son clave para analizar cómo varían los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) al modificar el suelo con el aditivo, ayudando así a entender mejor su grado de plasticidad una vez estabilizado. A continuación, se detalla la cantidad de ceniza volcánica utilizada según el tipo de ensayo correspondiente.

Cantidad de CV para el ensayo límites de Atterberg

Teniendo en cuenta lo que nos menciona el manual de materiales, para poder realizar este ensayo, se necesita de 150 a 200 gramos de muestra seca. La siguiente tabla muestra la cantidad de CV que se necesita, teniendo en cuenta también el número de repeticiones de dicho ensayo y por cada calicata seleccionada.

TABLA XVIII.
CANTIDAD DE CV PARA LÍMITES DE ATTERBERG C-01

CALICATA 01				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	Nº DE VECES	TOTAL
180,00 gr	0%	0,00 gr	3	0,00 gr
180,00 gr	5%	9,00 gr	3	27,00 gr
180,00 gr	10%	18,00 gr	3	54,00 gr
180,00 gr	15%	27,00 gr	3	81,00 gr
180,00 gr	20%	36,00 gr	3	108,00 gr
180,00 gr	30%	54,00 gr	3	162,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				432,00 gr

TABLA XIX.
CANTIDAD DE CV PARA LÍMITES DE ATTERBERG C-02

CALICATA 02				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	Nº DE VECES	TOTAL
180,00 gr	0%	0,00 gr	3	0,00 gr
180,00 gr	5%	9,00 gr	3	27,00 gr
180,00 gr	10%	18,00 gr	3	54,00 gr
180,00 gr	15%	27,00 gr	3	81,00 gr
180,00 gr	20%	36,00 gr	3	108,00 gr
180,00 gr	30%	54,00 gr	3	162,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				432,00 gr

TABLA XX.
CANTIDAD DE CV PARA LÍMITES DE ATTERBERG C-03

CALICATA 03				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	N° DE VECES	TOTAL
180,00 gr	0%	0,00 gr	3	0,00 gr
180,00 gr	5%	9,00 gr	3	27,00 gr
180,00 gr	10%	18,00 gr	3	54,00 gr
180,00 gr	15%	27,00 gr	3	81,00 gr
180,00 gr	20%	36,00 gr	3	108,00 gr
180,00 gr	30%	54,00 gr	3	162,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				432,00 gr

Luego de haber realizado el cálculo para cada una de las calicatas seleccionadas, teniendo en cuenta cada uno de los porcentajes de adición, así como el número de repeticiones por ensayo se obtuvo que se necesita 432 gramos de CV para cada una de las calicatas, esto hace un total de 1296 gramos.

Cantidad de CV para el ensayo de Proctor modificado

Para poder realizar este ensayo la norma específica la cantidad de muestra dependiendo el método que se esté utilizando. Para esta investigación se está utilizando el método B, lo que sugiere utilizar 3000 gramos por punto, esto genera 12000 gramos por cada Proctor que se realice. A continuación, se presenta el cálculo para determinar la cantidad de CV.

TABLA XXI.
CANTIDAD DE CV PARA PROCTOR MODIFICADO C-01

CALICATA 01				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	N° DE VECES	TOTAL
12000,00 gr	0%	0,00 gr	3	0,00 gr
12000,00 gr	5%	600,00 gr	3	1800,00 gr
12000,00 gr	10%	1200,00 gr	3	3600,00 gr
12000,00 gr	15%	1800,00 gr	3	5400,00 gr
12000,00 gr	20%	2400,00 gr	3	7200,00 gr
12000,00 gr	30%	3600,00 gr	3	10800,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				28800,00 gr

TABLA XXII.
CANTIDAD DE CV PARA PROCTOR MODIFICADO C-02

CALICATA 02				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	N° DE VECES	TOTAL
12000,00 gr	0%	0,00 gr	3	0,00 gr
12000,00 gr	5%	600,00 gr	3	1800,00 gr
12000,00 gr	10%	1200,00 gr	3	3600,00 gr
12000,00 gr	15%	1800,00 gr	3	5400,00 gr
12000,00 gr	20%	2400,00 gr	3	7200,00 gr
12000,00 gr	30%	3600,00 gr	3	10800,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				28800,00 gr

TABLA XXIII.
CANTIDAD DE CV PARA PROCTOR MODIFICADO C-03

CALICATA 03				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	N° DE VECES	TOTAL
12000,00 gr	0%	0,00 gr	3	0,00 gr
12000,00 gr	5%	600,00 gr	3	1800,00 gr
12000,00 gr	10%	1200,00 gr	3	3600,00 gr
12000,00 gr	15%	1800,00 gr	3	5400,00 gr
12000,00 gr	20%	2400,00 gr	3	7200,00 gr
12000,00 gr	30%	3600,00 gr	3	10800,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				28800,00 gr

En las tablas se detallan las cantidades exactas de ceniza volcánica (CV) que se incorporarán en los ensayos de Proctor modificado, utilizando muestras tomadas de cada una de las calicatas. Estas cantidades fueron calculadas en función del peso del suelo natural, medido en gramos, y del porcentaje de ceniza requerido para cada prueba. Como resultado de este cálculo, se determinó que por cada calicata se necesita un total de 28,8 kg de ceniza volcánica, lo que suma 86,4 kg de aditivo en total para todas las muestras.

Cantidad de CV para el ensayo de CBR en laboratorio

Del mismo modo que para los ensayos anteriores, para poder realizar se necesita un mínimo de 5000 gramos de muestra para cada molde, dado que un ensayo CBR consta de 3 puntos, se necesitaría 15000 gramos de muestra seca como mínimo. Teniendo en cuenta estas consideraciones a continuación se presenta el cálculo de aditivo (CV) para cada calicata.

TABLA XXIV.
CANTIDAD DE CV PARA CBR EN LABORATORIO C-01

CALICATA 01				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	N° DE VECES	TOTAL
15000,00 gr	0%	0,00 gr	5	0,00 gr
15000,00 gr	5%	750,00 gr	5	3750,00 gr
15000,00 gr	10%	1500,00 gr	5	7500,00 gr
15000,00 gr	15%	2250,00 gr	5	11250,00 gr
15000,00 gr	20%	3000,00 gr	5	15000,00 gr
15000,00 gr	30%	4500,00 gr	5	22500,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				60000,00 gr

TABLA XXV.
CANTIDAD DE CV PARA CBR EN LABORATORIO C-02

CALICATA 02				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	N° DE VECES	TOTAL
15000,00 gr	0%	0,00 gr	5	0,00 gr
15000,00 gr	5%	750,00 gr	5	3750,00 gr
15000,00 gr	10%	1500,00 gr	5	7500,00 gr
15000,00 gr	15%	2250,00 gr	5	11250,00 gr
15000,00 gr	20%	3000,00 gr	5	15000,00 gr
15000,00 gr	30%	4500,00 gr	5	22500,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				60000,00 gr

TABLA XXVI.
CANTIDAD DE CV PARA CBR EN LABORATORIO C-03

CALICATA 03				
SUELO NATURAL (gr)	% DE ADICIÓN DE CV	CV (gr)	N° DE VECES	TOTAL
15000,00 gr	0%	0,00 gr	5	0,00 gr
15000,00 gr	5%	750,00 gr	5	3750,00 gr
15000,00 gr	10%	1500,00 gr	5	7500,00 gr
15000,00 gr	15%	2250,00 gr	5	11250,00 gr
15000,00 gr	20%	3000,00 gr	5	15000,00 gr
15000,00 gr	30%	4500,00 gr	5	22500,00 gr
TOTAL DE CENIZA VOLCÁNICA				60000,00 gr

En las tablas se presenta la cantidad de CV utilizada para cada calicata, teniendo en cuenta las adiciones correspondientes, así como el número de repeticiones por ensayo. Dando como resultado de 60 Kg por cada una, haciendo un total de 180 Kg por las 3 calicatas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, cuyo objetivo principal fue evaluar la influencia de las cenizas volcánicas (CV) en la estabilización de arcillas expansivas para su uso como subrasante. Las pruebas y análisis realizados se llevaron a cabo sobre muestras extraídas de cinco calicatas representativas de la zona de estudio, evaluadas inicialmente en su estado natural para determinar sus propiedades físicas y mecánicas básicas.

Para comprender mejor el comportamiento del suelo, se realizaron ensayos enfocados en determinar sus propiedades físicas, siguiendo las normativas AASHTO y SUCS para su correcta clasificación. Además, se evaluaron las propiedades mecánicas de los suelos con el fin de identificar las condiciones más críticas y distinguir las diferencias entre las calicatas analizadas, tal como se detalla en capítulos anteriores.

La base para seleccionar los pozos de prueba que se investigarían en mayor profundidad fue principalmente la similitud de sus cualidades físicas y mecánicas, determinadas en las primeras pruebas. Por esta razón, las muestras de los pozos de prueba 01 (C-01), 02 (C-02) y 03 (C-03) fueron elegidas como típicas para los experimentos con cenizas volcánicas. Durante esta fase, se realizaron pruebas particulares, como el Proctor Modificado y el CBR, para investigar la influencia estabilizadora de la ceniza volcánica en las propiedades resistentes del suelo. Estos estudios permitieron a los investigadores evaluar cómo la adición de ceniza mejora las condiciones del suelo, haciéndolo apto para su uso como subrasante.

Contenido de humedad de muestras en estado natural

En realizar este ensayo, se tuvo en cuenta la normativa MTC E108, donde se extrajeron dos muestras por cada calicata con el fin de obtener un promedio y los resultados tengan mayor exactitud. Una vez que se realizó el ensayo en laboratorio, se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA XXVII.
CONTENIDO DE HUMEDAD DE MUESTRAS EN ESTADO NATURAL

CONTENIDO DE HUMEDAD				
CALICATA	PROFUNDIDAD	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
C-1	1,50 m	25,10%	24,36%	24,73%
C-2	1,50 m	20,43%	22,65%	21,54%
C-3	1,50 m	22,70%	17,83%	20,26%
C-4	1,50 m	18,86%	22,65%	20,75%
C-5	1,50 m	20,15%	20,40%	20,27%

La TABLA XXVII exhibe los valores correspondientes al contenido de humedad natural derivados de las muestras recolectadas en cinco calicatas (C-1 a C-5), todas a una profundidad uniforme de 1.50 metros, en el distrito de La Victoria – Chiclayo. Para cada calicata se llevaron a cabo dos pruebas, cuyos resultados posibilitaron el cálculo de un valor promedio representativo.

Los resultados obtenidos indican que la concentración de humedad natural en las arcillas expansivas oscila entre el 20.26% (C-3) y el 24.73% (C-1). El valor más elevado se observa en la calicata C-1, lo que indica una potencial incrementada retención de agua en dicha zona, posiblemente atribuible a características específicas del perfil del suelo, tales como un contenido elevado de finos o una menor capacidad de drenaje. En contraste, la calicata C-3 exhibió un valor promedio inferior, lo cual podría estar vinculado a un suelo con una plasticidad reducida o una compactación natural más elevada.

Estos valores son cruciales para el diseño de estabilización del suelo, dado que el contenido de humedad ejerce una influencia directa sobre las características mecánicas de las arcillas expansivas, tales como su hinchamiento, cohesión y resistencia a las cargas. Adicionalmente, el conocimiento de la humedad natural es crucial para establecer la cantidad óptima de ceniza volcánica que debe ser incorporada en el proceso de estabilización, con el objetivo de optimizar el rendimiento del suelo como subrasante.

Ensayo granulométrico por tamizado

Siguiendo los procedimientos establecidos en la norma MTC E 107, se llevó a cabo el ensayo de granulometría por tamizado en las muestras de suelo natural tomadas de las cinco calicatas. Antes del análisis, las muestras fueron lavadas para garantizar resultados precisos. Este ensayo permitió determinar la clasificación del suelo según su distribución granulométrica.

TABLA XXVIII.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

CALICATA	% DE GRAVA		% DE ARENA			% ARCILLA Y LIMO
	G. G.	G. F.	A.G.	A.M.	A.F.	FINOS
C-01	0,00%	0,00%	0,80%	1,10%	1,30%	96,80%
C-02	0,00%	0,00%	1,30%	1,80%	4,70%	92,20%
C-03	0,00%	0,00%	1,20%	0,90%	4,60%	93,30%
C-04	0,00%	0,00%	0,10%	1,30%	7,00%	91,60%
C-05	0,00%	0,00%	0,40%	0,40%	2,60%	96,60%

La TABLA XXVIII muestra los resultados obtenidos del ensayo de granulometría muestran que, en todas las calicatas, existe una alta concentración de finos (arcilla y limo), lo cual confirma la naturaleza predominantemente arcillosa del suelo en la zona de estudio. De manera específica, las calicatas 01 y 05 presentan los porcentajes más altos de finos, con valores de 96.80% y 96.60% respectivamente, lo que sugiere que estas zonas tienen un comportamiento más homogéneo en términos de composición. Por otro lado, la calicata 04 registra el menor porcentaje de finos, con 91.60%, lo que podría indicar una ligera variación en la granulometría del suelo en comparación con las demás calicatas.

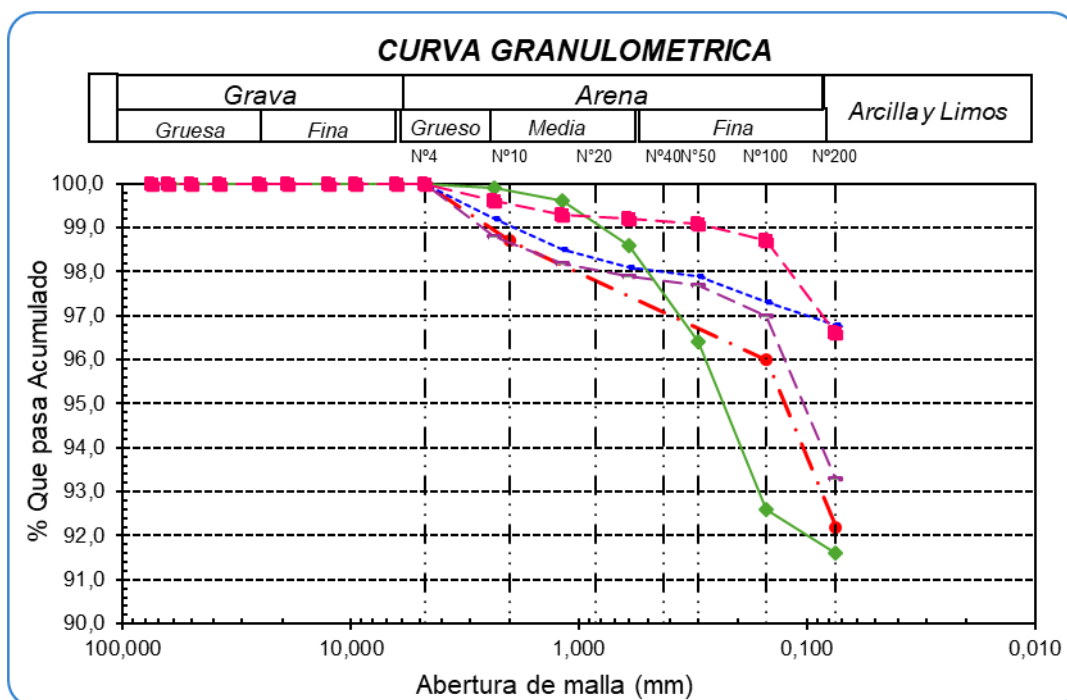


Gráfico 2. Curva granulométrica de las 5 calicatas

Ensayo de granulometría por sedimentación

De acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma MTC E 109, se realizó el ensayo de hidrometría utilizando la fracción fina de las muestras de suelo natural, es decir, aquella que logró pasar por la malla N.º 10. Esta prueba se aplicó a las cinco calicatas con la finalidad de estudiar cómo se distribuyen las partículas más finas, específicamente aquellas que atraviesan el tamiz N.º 200. Gracias a este análisis, fue posible determinar el porcentaje de material que pasa según su diámetro, lo que brinda información valiosa sobre las características granulométricas del suelo más fino.

A continuación, se muestran los gráficos de las curvas granulométricas generadas mediante el enfoque hidrométrico para cada uno de los cinco pozos de ensayo de la región de investigación. Estas curvas permiten ver y comparar la distribución de las diferentes granulometrías encontradas en los suelos arcillosos ensayados.

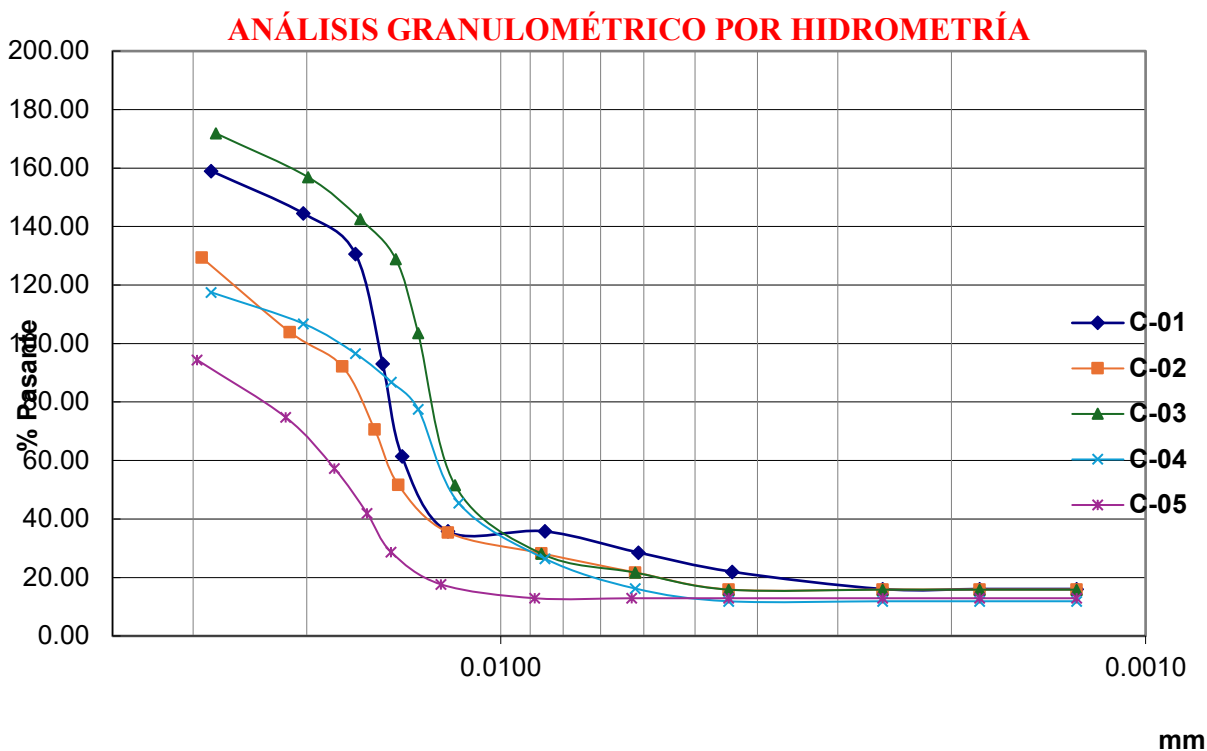


Gráfico 3. Curva granulométrica por hidrometría

Ensayo de Gravedad específica

La prueba para medir la gravedad específica de los sólidos se realizó de forma uniforme en las muestras recogidas en las cinco fosas de prueba, de acuerdo con la norma MTC E 113. Este proceso es fundamental porque permite determinar un atributo físico vital del suelo: la densidad relativa de las partículas sólidas en comparación con el agua.

TABLA XXIX.

RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

CALICATA	PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS	
C-01	2,564	gr/cm ³
C-02	2,651	gr/cm ³
C-03	2,741	gr/cm ³
C-04	2,892	gr/cm ³
C-05	2,543	gr/cm ³

Los resultados obtenidos evidencian una variación en la gravedad específica de los sólidos, con valores que oscilan entre 2.543 g/cm³ y 2.892 g/cm³. Esta variabilidad indica diferencias en la densidad del suelo según el punto de muestreo. La calicata C-04 registró el valor más alto

(2.892 g/cm³), lo que sugiere una mayor concentración de minerales pesados o una composición diferente en comparación con las otras muestras. Por otro lado, la calicata C-05 mostró el valor más bajo (2.543 g/cm³), posiblemente asociado a una menor densidad mineral o a la presencia de materiales más livianos en su composición.

Ensayo para determinar los Límites de Atterberg

El objetivo de esta prueba era calcular el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el Índice de Plasticidad (PI) del suelo en su forma natural. Estos criterios son fundamentales para comprender cómo reacciona el suelo a los cambios de humedad, ya que permiten evaluar la capacidad del suelo para deformarse sin romperse, la cohesividad y la expansión. Para garantizar la exactitud y fiabilidad de los resultados, se utilizó el MTC E 110 para el límite líquido y el MTC E 111 para el límite plástico.

TABLA XXX.
RESULTADOS LÍMITES DE ATTERBERG

CALICATA	L. LÍQUIDO	L. PLÁSTICO	I. PLASTICIDAD
C-01	53,02	25,15	27,87
C-02	53,23	22,74	30,49
C-03	45,87	23,79	22,08
C-04	33,15	19,21	13,94
C-05	33,13	19,51	13,62

Clasificación de muestras

Para evaluar el tipo de suelo presente en la región de la investigación, se utilizaron los sistemas de clasificación AASHTO y SUCS, generalmente reconocidos por su eficacia en la clasificación de materiales en función de sus cualidades físicas y comportamiento previsto. Esta categorización se basó en los resultados de las pruebas granulométricas, que indicaban la distribución del tamaño de las partículas, así como en las pruebas de los límites de Atterberg, que permitían evaluar la consistencia del suelo mediante el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad. Estos conocimientos nos permitieron describir mejor el tipo de suelo y predecir su comportamiento en distintos escenarios de uso.

TABLA XXXI.
RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

CALICATA	SUCS	AASHTO
	DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN
C-01	CH	A-7-6 (18)
	Arcilla de alta plasticidad	Malo
C-02	CH	A-7-6 (15)
	Arcilla de alta plasticidad	Malo
C-03	CL	A-7-6 (14)
	Arcilla de baja plasticidad	Malo
C-04	CL	A-6 (10)
	Arcilla de baja plasticidad	Malo
C-05	CL	A-6 (10)
	Arcilla de baja plasticidad	Malo

Ensayo de Proctor modificado

Este ensayo siguió los parámetros descritos en la norma MTC E 115 del Manual de Ensayos de Materiales del MTC. Se adoptó la técnica de compactación «A», que consiste en compactar el suelo en cinco niveles utilizando un molde Proctor de 4 pulgadas de diámetro y 25 golpes en cada capa. Esta prueba determina dos parámetros críticos: el contenido óptimo de humedad (OCH) y la densidad seca máxima (MDS). Estas mediciones son fundamentales para evaluar las cualidades del suelo y comprender cómo se comporta bajo distintos niveles de humedad y compactación.

TABLA XXXII.
RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO NATURAL

CALICATA	MDS	OCH
C-01	1,894	12,50
C-02	1,847	14,25
C-03	1,882	10,50
C-04	1,937	10,80
C-05	1,959	10,40

La TABLA XXXII revela que el pozo de prueba C-05 registró la mayor Densidad Seca Máxima (1.959 g/cm³), lo que indica que este suelo tiene un mayor potencial de compactación. Esto significa que, cuando se utiliza como subrasante, puede proporcionar una mayor capacidad portante. El pozo de ensayo C-02 presentó el valor más bajo (1.847 g/cm³), lo que sugiere una densidad algo inferior a la de otras muestras. En cuanto al contenido de humedad óptimo (CHO), la probeta C-02 tenía el valor más alto (14,25%), lo que indica que necesitaba más agua para producir una compactación óptima.

Ensayo de CBR en laboratorio

El ensayo de CBR se realizó siguiendo los parámetros y requisitos establecidos en la normativa MTC E 132 del Manual de Ensayo de Materiales del MTC. Este procedimiento permitió obtener los valores de la Relación de Soporte de California (CBR), así como los valores de expansión. Para ello, se sumergieron las muestras provenientes de las 5 calicatas en agua durante un período de 96 horas (cuatro días), garantizando que se cumplieran las condiciones necesarias para evaluar su comportamiento.

TABLA XXXIII.
RESULTADOS DE CBR NATURAL

CALICATA	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
C-01	2	2	5,12
C-02	3	3	4,08
C-03	3	3	4,76
C-04	3	4	3,91
C-05	5	7	2,44

En la TABLA XXXIII se presenta un análisis que permitió descartar las calicatas C-04 y C-05, ya que mostraron los valores más altos en el ensayo CBR, con un 7% y 4% respectivamente, además de registrar los porcentajes más bajos de expansión, destacando especialmente la calicata C-05 con apenas un 2.44%. Estos resultados indican que ambos suelos tienen buena capacidad portante y un comportamiento expansivo reducido, lo cual los hace menos prioritarios para procesos de estabilización. Dado que el enfoque de esta investigación está en mejorar suelos con características menos favorables, se optó por seleccionar las calicatas C-01, C-02 y C-03, que presentaron resultados más críticos, es decir, menor resistencia y mayor expansión. Estas condiciones las convierten en candidatas ideales para evaluar el efecto estabilizador de la ceniza volcánica.

En resumen, el criterio adoptado fue centrarse en mejorar los suelos más problemáticos — con menor capacidad de soporte y mayor potencial de expansión—, dejando de lado aquellas muestras que, por sus propiedades, ya ofrecen una mayor estabilidad natural. Una vez identificadas las calicatas C-01, C-02 y C-03 como las más representativas de estas condiciones menos favorables, se procedió a realizar los ensayos correspondientes.

Estas pruebas, previamente descritas en capítulos anteriores, se aplicaron tanto a las muestras en su estado natural como a aquellas preparadas con distintos porcentajes de ceniza volcánica. El objetivo fue analizar de manera completa cómo influye este aditivo en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, y evaluar su efectividad como estabilizante. Para ello, se cuidó cada etapa del proceso experimental, desde la preparación de las mezclas con los porcentajes definidos de ceniza, hasta el registro detallado de los datos, garantizando la uniformidad de las muestras y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Ensayo de granulometría por hidrometría.

Con el propósito de obtener mejores resultados, se repitió el ensayo de hidrometría, para cada una de las 3 calicatas. Y los resultados son los que se muestran a continuación.

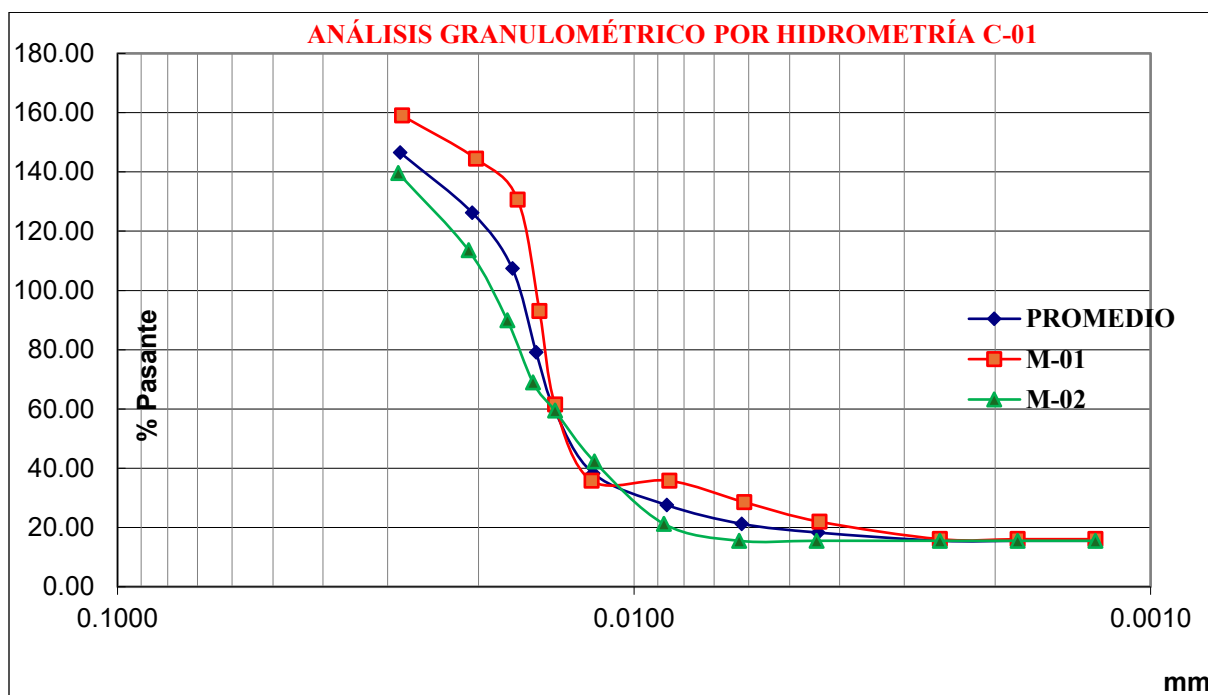


Gráfico 4. Resultados de hidrometría calicata 01

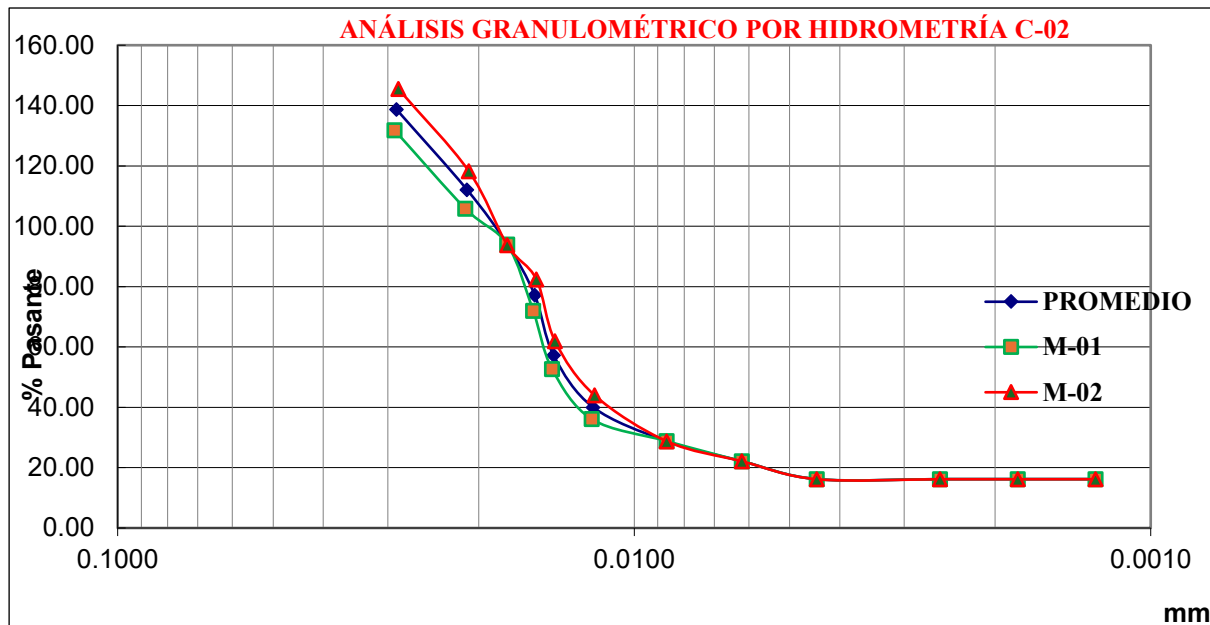


Gráfico 5. Resultados de hidrometría calicata 02

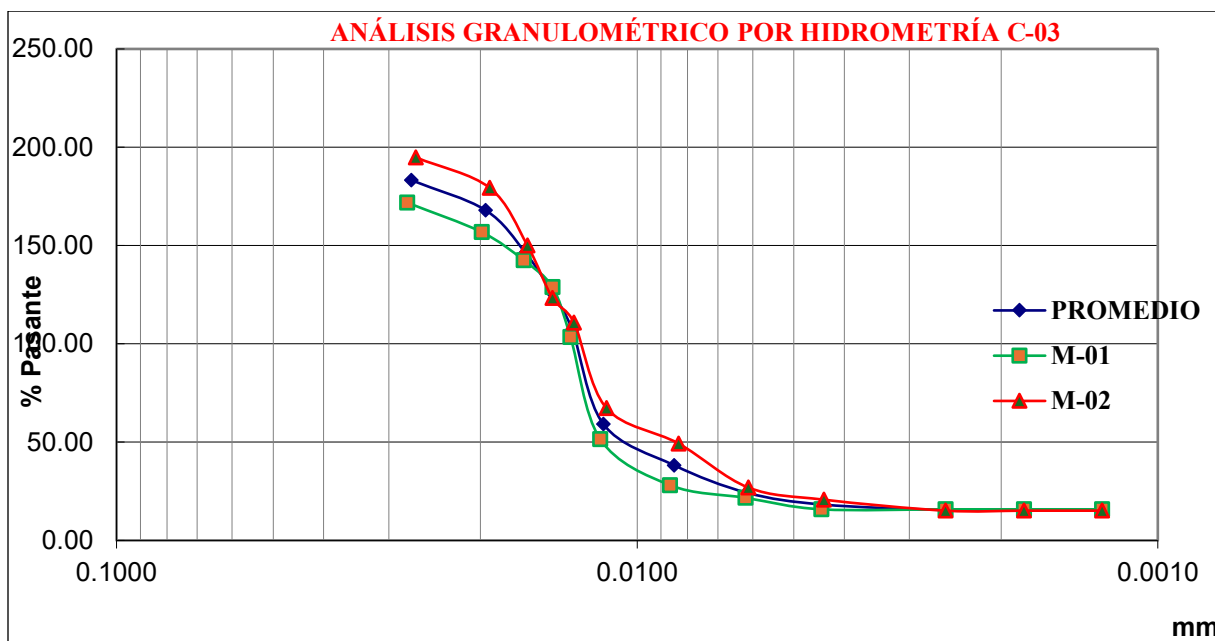


Gráfico 6. Resultados de hidrometría calicata 03

Ensayo de gravedad específica

Del mismo modo que en el ensayo anterior, también se agregó otra repetición del ensayo de gravedad específicas a las muestras seleccionadas para obtener un promedio, y de esta manera tener más precisión en la obtención de resultados.

TABLA XXXIV.
RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

CALICATA	M-01	M-02	PROMEDIO
C-01	2,564 gr/cm ³	2,516 gr/cm ³	2,540 gr/cm³
C-02	2,651 gr/cm ³	2,571 gr/cm ³	2,611 gr/cm³
C-03	2,741 gr/cm ³	2,734 gr/cm ³	2,738 gr/cm³

La Tabla XXVIII expone los hallazgos del experimento de densidad aparente llevado a cabo con muestras de suelo en su estado natural, recolectadas de tres calicatas distintas en el distrito de La Victoria – Chiclayo. Cada calicata fue objeto de dos mediciones (M-01 y M-02), resultando en un valor promedio expresado en (gr/cm³).

Los hallazgos indican que la calicata 1 exhibió una densidad aparente promedio de 2.540 gr/cm³, mientras que la calicata 2 registró el valor más elevado con 2.738 gr/cm³. Estos valores evidencian una menor fluctuación en la densidad aparente del suelo en estado natural, la cual puede atribuirse a factores como la compactación natural del terreno, la existencia de materiales gruesos o finos, y el nivel de humedad durante el muestreo.

La determinación de la densidad aparente es crítica en la investigación de la estabilización de suelos, ya que influye directamente en la capacidad portante del suelo y en el diseño de las mezclas estabilizadas con cenizas volcánicas. Un aumento de la densidad aparente se asocia típicamente con un suelo más compacto, lo que puede traducirse en un mejor comportamiento mecánico cuando se utiliza como subrasante.

Límites de Atterberg

Tras la selección de las tres fosas con las condiciones más desfavorables, las pruebas de los límites de Atterberg se realizaron tanto con el suelo en su estado natural como con los cinco porcentajes distintos de ceniza volcánica (CV) añadidos. Como cada prueba se realizó tres veces para cada muestra, los resultados fueron más precisos y pudimos examinar a fondo cómo la adición del aditivo alteraba las características del suelo. Además de minimizar los errores potenciales, este enfoque mejoró la comprensión de la reacción del material al procedimiento de estabilización. Las tablas correspondientes que figuran a continuación ofrecen un resumen de los resultados.

TABLA XXXV.
RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-01

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C01 - NATURAL	1	52,20	25,85	26,35
C01+5% CV	1	46,50	22,46	24,03
C01+10% CV	1	52,06	30,06	22,00
C01+15% CV	1	44,33	23,00	21,33
C01+20% CV	1	41,92	20,56	21,36
C01+30% CV	1	42,59	22,26	20,34
CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C01 - NATURAL	2	58,23	30,06	28,17
C01+5% CV	2	47,17	21,28	25,89
C01+10% CV	2	56,52	34,23	22,29
C01+15% CV	2	44,28	23,60	20,67
C01+20% CV	2	40,68	19,54	21,14
C01+30% CV	2	43,60	23,50	20,10
CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C01 - NATURAL	3	56,73	28,93	27,80
C01+5% CV	3	48,24	25,30	22,94
C01+10% CV	3	56,52	34,23	22,29
C01+15% CV	3	44,28	23,60	20,68
C01+20% CV	3	41,71	21,66	20,05
C01+30% CV	3	44,90	24,80	20,10

La TABLA XXXV presenta los hallazgos de los límites de Atterberg (LL, LP, IP) derivados de las muestras de la calicata C01, tanto en su estado natural como mediante la adición de diversos porcentajes de ceniza volcánica (CV). En su estado natural, el suelo exhibe un elevado índice de plasticidad (IP entre 26.35 y 28.17), lo que evidencia una plasticidad elevada característica de las arcillas expansivas. No obstante, al integrar ceniza volcánica en proporciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 30%, se evidencia una disminución gradual del Índice de Plasticidad (IP), alcanzando valores entre 20.05 y 25.89, lo que sugiere una mejora en la plasticidad del suelo. Además, se observa una reducción en los valores de límite líquido y límite plástico con el incremento del contenido de ceniza, lo que indica que la ceniza volcánica contribuye a la disminución de la actividad del suelo, facilitando su estabilidad y permitiendo su utilización como subrasante en el distrito de La Victoria – Chiclayo.

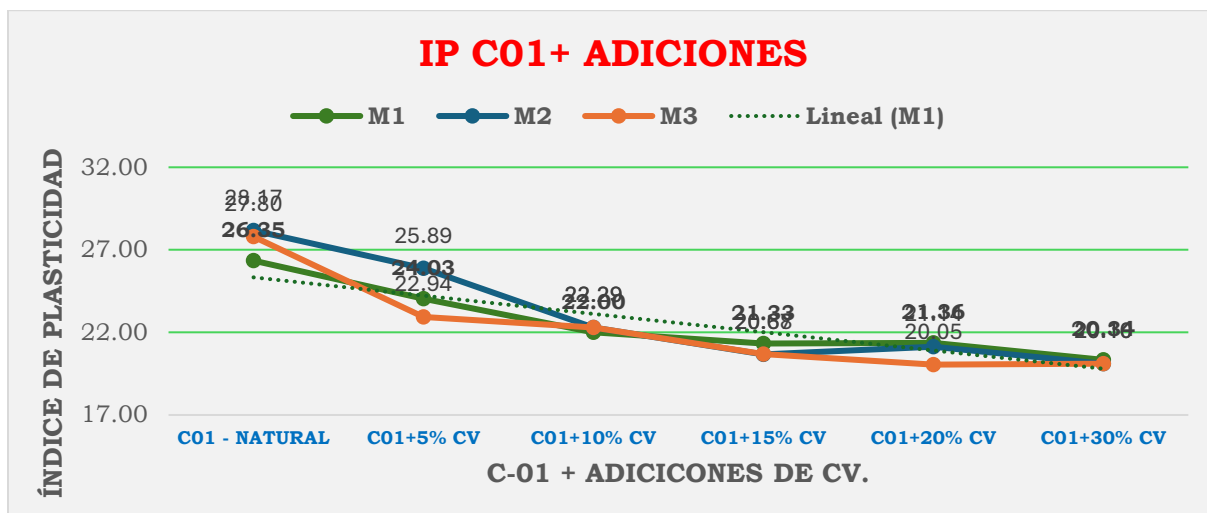


Gráfico 7. Variación del índice plástico para C-01 + adición de CV

TABLA XXXVI.

RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-01 PROMEDIO

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C01 - NATURAL	PROMEDIO	55,72	28,28	27,44
C01+5% CV	PROMEDIO	47,30	23,01	24,29
C01+10% CV	PROMEDIO	55,03	32,84	22,19
C01+15% CV	PROMEDIO	44,29	23,40	20,89
C01+20% CV	PROMEDIO	41,44	20,59	20,85
C01+30% CV	PROMEDIO	43,70	23,52	20,18

La TABLA XXXVI presenta los hallazgos de los límites de Atterberg (LL, LP, IP) derivados de las muestras de la calicata C01, tanto en su estado natural como mediante la adición de diversos porcentajes de ceniza volcánica (CV). En su estado natural, el suelo exhibe un índice promedio de plasticidad (IP) de 27.44, lo que evidencia una plasticidad elevada característica de las arcillas expansivas. La integración progresiva de ceniza volcánica conduce a una reducción constante del Índice de Plasticidad (IP), alcanzando un valor mínimo de 20.18 con un 30% de CV, lo cual señala una mejora notable en la plasticidad del suelo. Además, los parámetros de límite líquido (LL) y límite plástico (LP) exhiben una tendencia a decrecer con el incremento de ceniza, subrayando el efecto estabilizante de este aditivo. Estos hallazgos corroboran que la ceniza volcánica disminuye la plasticidad del suelo, optimizando su desempeño geotécnico y facilitando su utilización como subrasante en el distrito La Victoria – Chiclayo

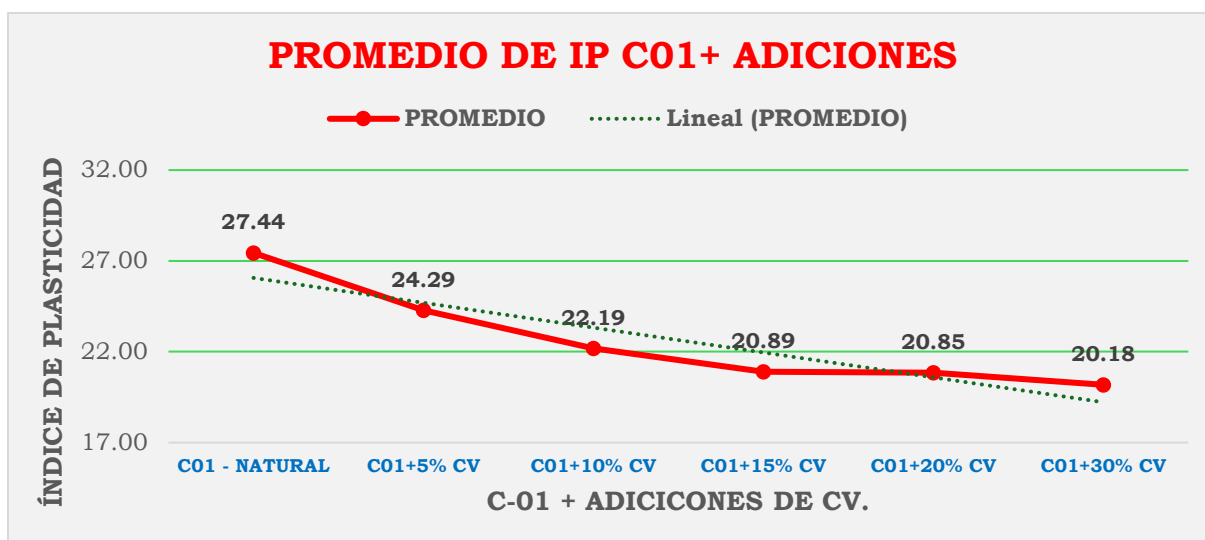


Gráfico 8. Promedio del índice plástico para C-01 + adición de CV

TABLA XXXVII.

RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-02

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C02 - NATURAL	1	56,25	24,35	31,90
C02+5% CV	1	47,52	21,43	26,09
C02+10% CV	1	46,85	22,80	24,05
C02+15% CV	1	45,80	22,16	23,64
C02+20% CV	1	41,49	19,94	21,55
C02+30% CV	1	41,57	21,59	19,98

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C02 - NATURAL	2	55,03	24,59	30,44
C02+5% CV	2	45,77	21,15	24,62
C02+10% CV	2	45,55	21,22	24,33
C02+15% CV	2	44,05	20,99	23,06
C02+20% CV	2	43,61	21,33	22,28
C02+30% CV	2	42,08	20,92	21,16

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C02 - NATURAL	3	58,82	28,93	29,89
C02+5% CV	3	48,70	23,08	25,62
C02+10% CV	3	44,68	22,80	21,88
C02+15% CV	3	43,81	21,63	22,18
C02+20% CV	3	41,01	19,77	21,24
C02+30% CV	3	43,01	20,90	22,11

La TABLA XXXVII muestra los resultados de los límites de Atterberg (LL, LP e IP) para las muestras tomadas en la calicata C02, tanto en su estado original como después de agregar diferentes cantidades de ceniza volcánica. En su estado natural, el suelo presenta un Índice de

Plasticidad bastante alto, con un promedio por encima de 30, lo que indica la típica plasticidad que tienen las arcillas expansivas. Conforme se aumenta el porcentaje de ceniza volcánica (5%, 10%, 15%, 20% y 30%), se observa una disminución notable tanto en el límite líquido como en el índice de plasticidad. Esta reducción es especialmente marcada cuando se llega al 30% de ceniza, donde el índice de plasticidad baja a menos de 22 en todas las muestras analizadas. Estos resultados confirman que la ceniza volcánica funciona muy bien como estabilizador, ya que reduce la plasticidad del suelo y mejora sus características para ser utilizado como subrasante en obras viales en el distrito de La Victoria – Chiclayo.

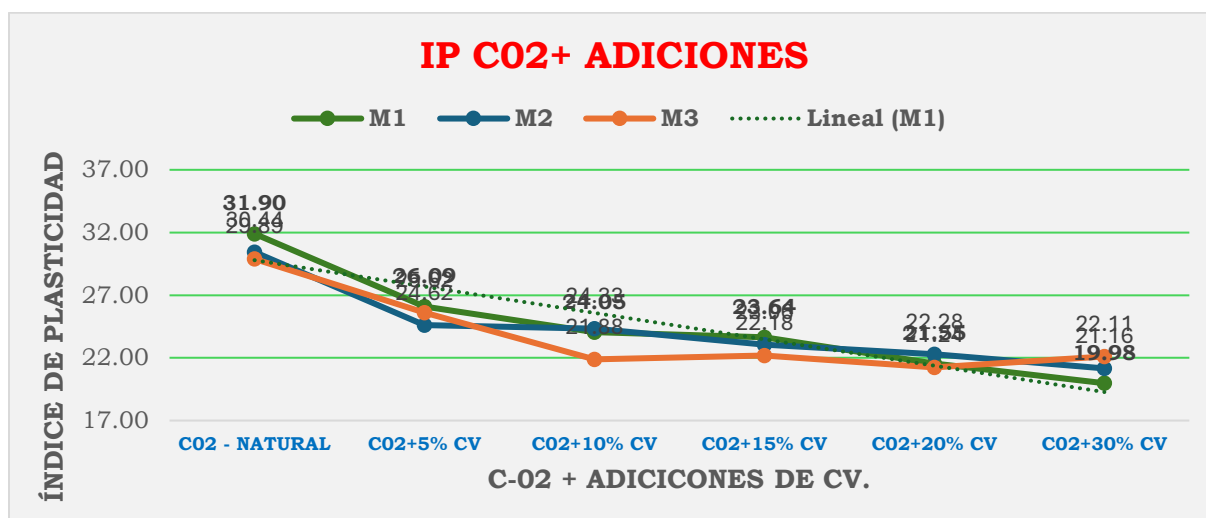


Gráfico 9. Variación de índice plástico para C-02 + adición de CV

TABLA XXXVIII.

RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-02 PROMEDIO

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C02 - NATURAL	PROMEDIO	56,70	25,96	30,74
C02+5% CV	PROMEDIO	47,33	21,89	25,44
C02+10% CV	PROMEDIO	45,69	22,27	23,42
C02+15% CV	PROMEDIO	44,55	21,59	22,96
C02+20% CV	PROMEDIO	42,04	20,35	21,69
C02+30% CV	PROMEDIO	42,22	21,14	21,08

La Tabla XXXVIII muestra los valores medio de los límites de Atterberg (LL, LP e IP) de las muestras asociadas a la calicata C02 en estado natural, con variados porcentajes de adición de ceniza volcánica (CV). Dentro de su condición natural, el suelo exhibe un límite líquido promedio de 56.70% y un índice de plasticidad de 30.74%, lo que lo clasifica como una arcilla de elevada plasticidad, poco adecuada para su utilización como subrasante. La incorporación

progresiva de ceniza volcánica en proporciones que oscilan entre el 5% y el 30% revela una tendencia decreciente en el índice de plasticidad, alcanzando un valor mínimo del 21.08% con la adición del 30%. Esta disminución progresiva en el IP evidencia la eficacia de la ceniza volcánica como agente estabilizante, mitigando la plasticidad del suelo y optimizando su comportamiento físico, lo que lo convierte en una opción más adecuada para su implementación en capas de subrasante en proyectos viales en el distrito La Victoria – Chiclayo.

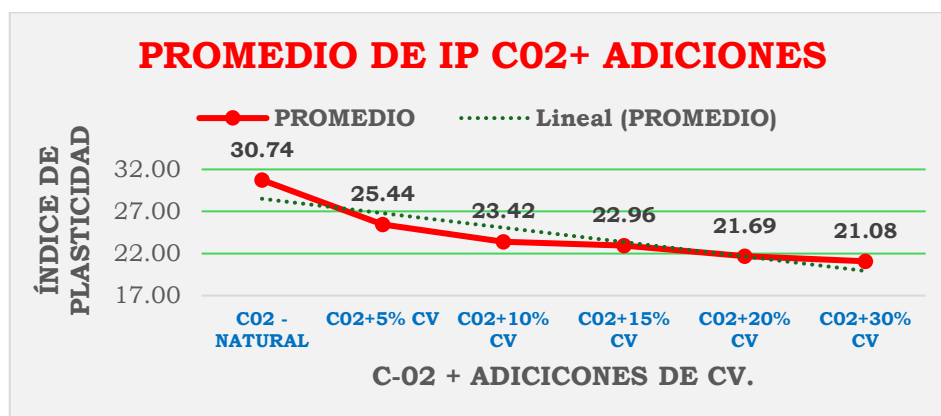


Gráfico 10. Promedio del índice plástico + adición de CV

TABLA XXXIX.

RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-03

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C03 - NATURAL	1	49,09	23,63	25,46
C03+5% CV	1	45,92	21,43	24,49
C03+10% CV	1	41,18	19,10	22,08
C03+15% CV	1	40,71	20,43	20,28
C03+20% CV	1	39,96	20,18	19,78
C03+30% CV	1	39,15	19,52	19,63
CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C03 - NATURAL	2	49,50	23,32	26,18
C03+5% CV	2	44,50	21,15	23,35
C03+10% CV	2	42,00	20,23	21,77
C03+15% CV	2	40,78	19,51	21,27
C03+20% CV	2	41,47	20,59	20,88
C03+30% CV	2	41,26	20,82	20,44
CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C03 - NATURAL	3	47,01	20,29	26,72
C03+5% CV	3	44,70	21,36	23,34
C03+10% CV	3	41,50	19,30	22,20
C03+15% CV	3	43,21	20,29	22,92
C03+20% CV	3	42,21	22,09	20,12
C03+30% CV	3	41,55	21,89	19,66

La Tabla XXXIX muestra los valores correspondientes a los límites de Atterberg (LL, LP e IP) obtenidos en la calicata C03 bajo condiciones naturales y con la adición progresiva de ceniza volcánica (CV) en diversas proporciones. En su estado natural, el suelo exhibe un elevado índice de plasticidad, con valores que fluctúan entre el 25.46% y el 26.72%, lo que sugiere un comportamiento plástico que podría impactar negativamente su rendimiento como subrasante. No obstante, la integración de CV en proporciones del 5% al 30% evidencia una disminución progresiva del índice de plasticidad, alcanzando valores mínimos del 19.63%, lo que constituye una mejora significativa en sus propiedades físico-mecánicas. Esta reducción sostenida de la plasticidad pone de manifiesto el efecto estabilizante de la ceniza volcánica, potenciando la idoneidad del suelo para su aplicación en estructuras viales, especialmente en la optimización de subrasantes en el distrito La Victoria – Chiclayo.

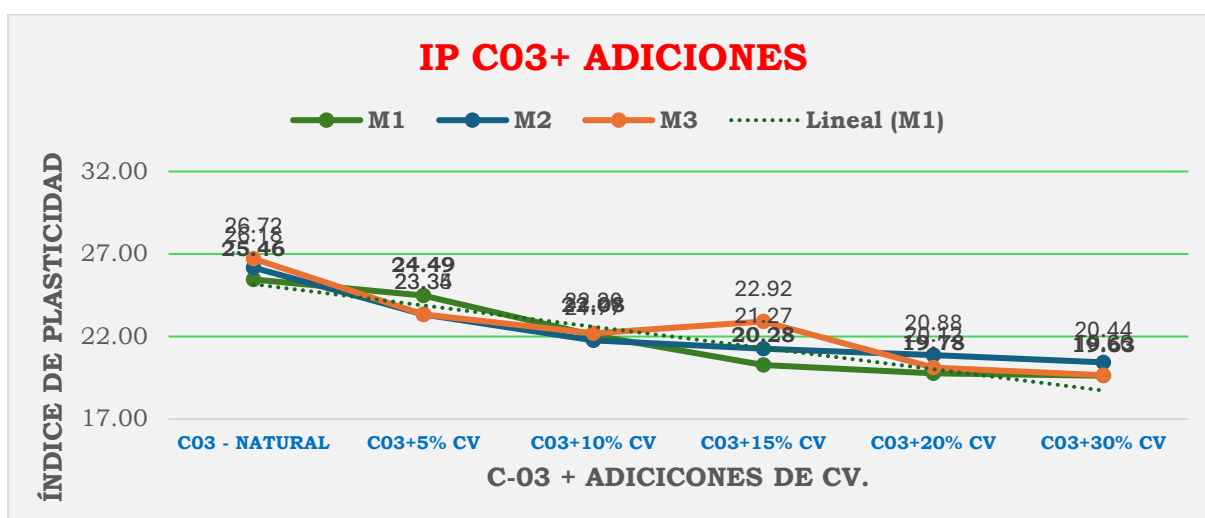


Gráfico 11. Variación de índice plástico para C-03 + adición de CV

TABLA XL.

RESULTADOS DE LÍMITES DE ATTERBERG C-03 PROMEDIO

CALICATA	MUESTRA	LL	LP	IP
C03 - NATURAL	PROMEDIO	48,53	22,41	26,12
C03+5% CV	PROMEDIO	45,04	21,31	23,73
C03+10% CV	PROMEDIO	41,56	19,54	22,02
C03+15% CV	PROMEDIO	41,57	20,08	21,49
C03+20% CV	PROMEDIO	41,21	20,95	20,26
C03+30% CV	PROMEDIO	40,65	20,74	19,91

La Tabla XL muestra los valores medios de los límites de Atterberg asociados con la calicata C03, tanto en su estado natural como con la adición de diversos porcentajes de ceniza volcánica (CV). Dentro de su estado natural, el suelo exhibe un Índice de Plasticidad (IP) del 26.12%, lo

que evidencia un elevado comportamiento plástico. La integración de ceniza volcánica en proporciones incrementadas del 5% al 30% manifiesta una reducción progresiva del Índice de Producción (IP), descendiendo hasta alcanzar un 19.91% con la adición del 30%. Este declive también se manifiesta en el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), lo que sugiere que la incorporación de CV potencia la estabilidad y disminuye la plasticidad del suelo. Por lo tanto, estos hallazgos consolidan la eficacia de la ceniza volcánica como agente estabilizante, fomentando su factibilidad para optimizar suelos destinados a estratos de subrasante en proyectos de infraestructura vial en el distrito La Victoria – Chiclayo.

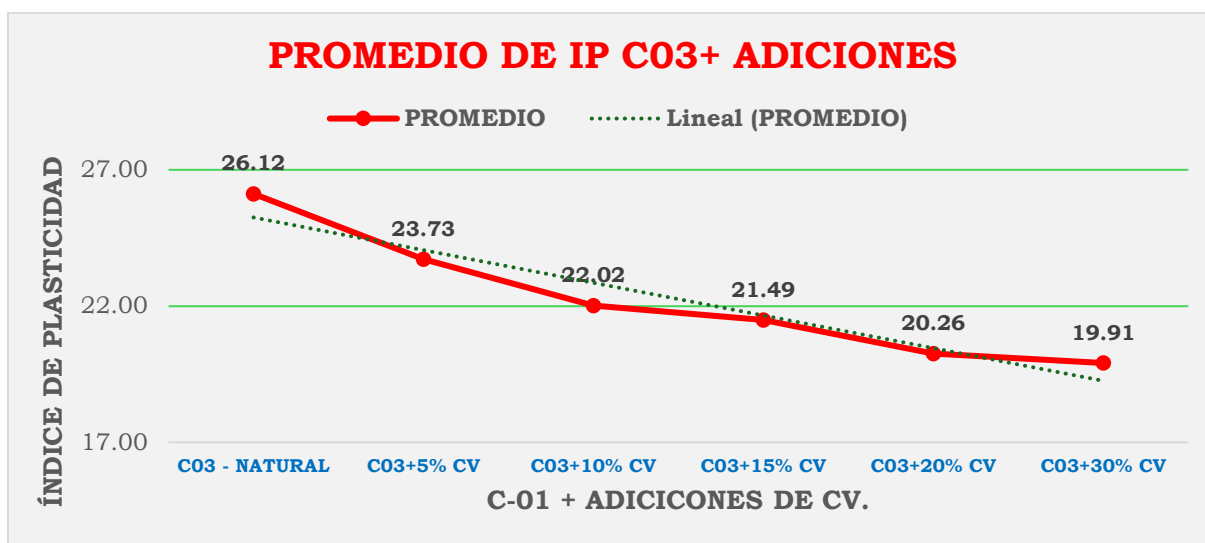


Gráfico 12. Promedio de índice plástico + adición de CV

El análisis de los resultados muestra una clara reducción en el índice plástico (IP) conforme se incrementa la cantidad de ceniza volcánica (CV) añadida a las muestras de suelo de las tres calicatas seleccionadas. En su estado original, el suelo presenta valores más elevados de IP, pero al incorporar la ceniza volcánica, este índice tiende a disminuir, lo que indica que la plasticidad del suelo se reduce a medida que se añade mayor proporción del aditivo. Por ejemplo, en la calicata C-01, el IP baja de 27.44 en su condición natural a 20.18 con un 30% de ceniza volcánica, lo que equivale a una reducción del 26.43%. En la calicata C-02, esta disminución es aún mayor, pasando de 30.74 a 21.08 con la misma dosis de CV, representando un descenso del 31.45%. Por último, en la calicata C-03, el índice plástico se reduce de 26.12 a 19.91, lo que corresponde a una caída del 23.76%.

Este comportamiento se explica por la interacción que ocurre entre las partículas de ceniza volcánica y las del suelo, que altera las propiedades cohesivas del material y disminuye su capacidad para absorber y retener humedad, lo que a su vez reduce su plasticidad. Se observa

que los cambios más significativos en el índice plástico ocurren cuando la cantidad de ceniza añadida está entre el 10% y el 20%.

Ensayo de Proctor modificado

De manera similar al procedimiento realizado con los límites de Atterberg, se llevaron a cabo ensayos de Proctor Modificado tanto en el estado natural de las muestras como con cada uno de los porcentajes de adición de (CV). Cada ensayo fue repetido tres veces por muestra, con el objetivo de garantizar la precisión de los resultados y minimizar cualquier posible variación en los datos. Este enfoque permitió obtener un promedio confiable para determinar la máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad (OCH) de cada mezcla.

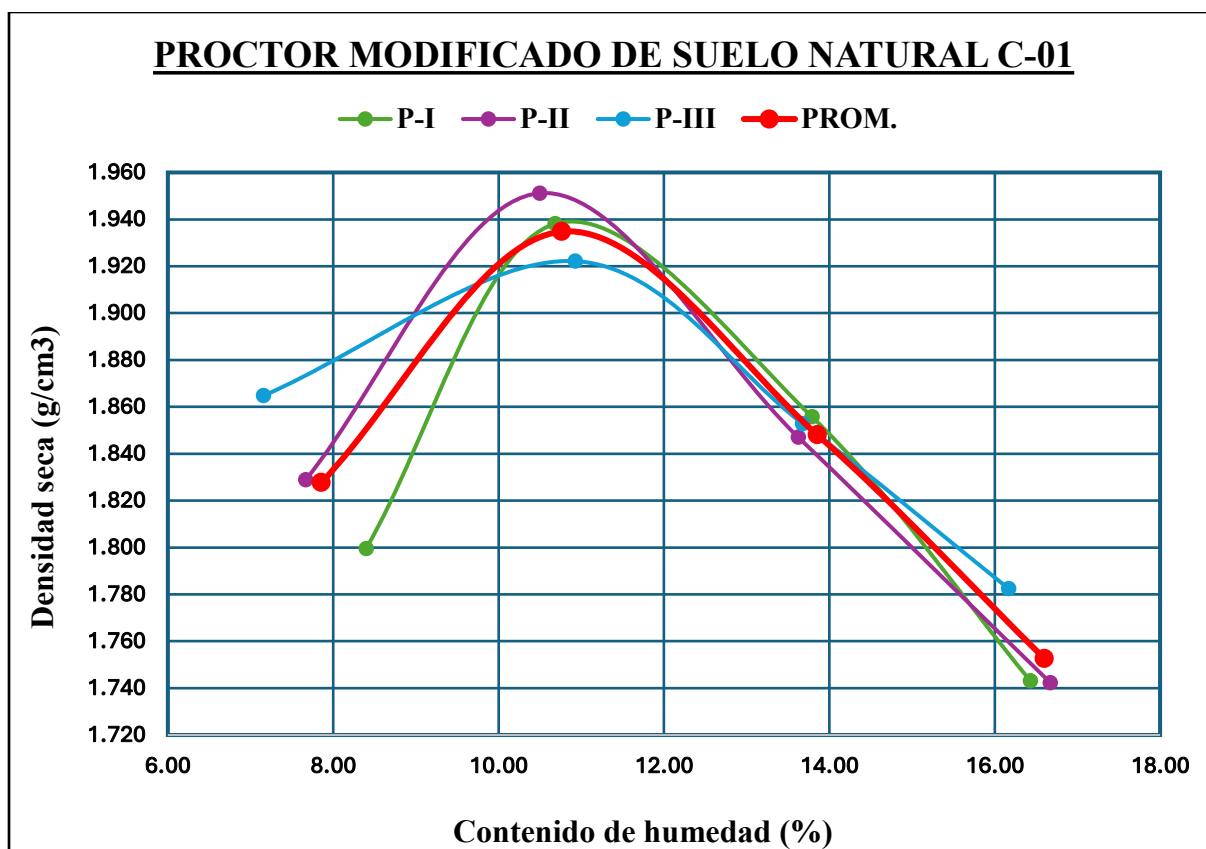


Gráfico 13. Resultados de Proctor modificado SN C-01

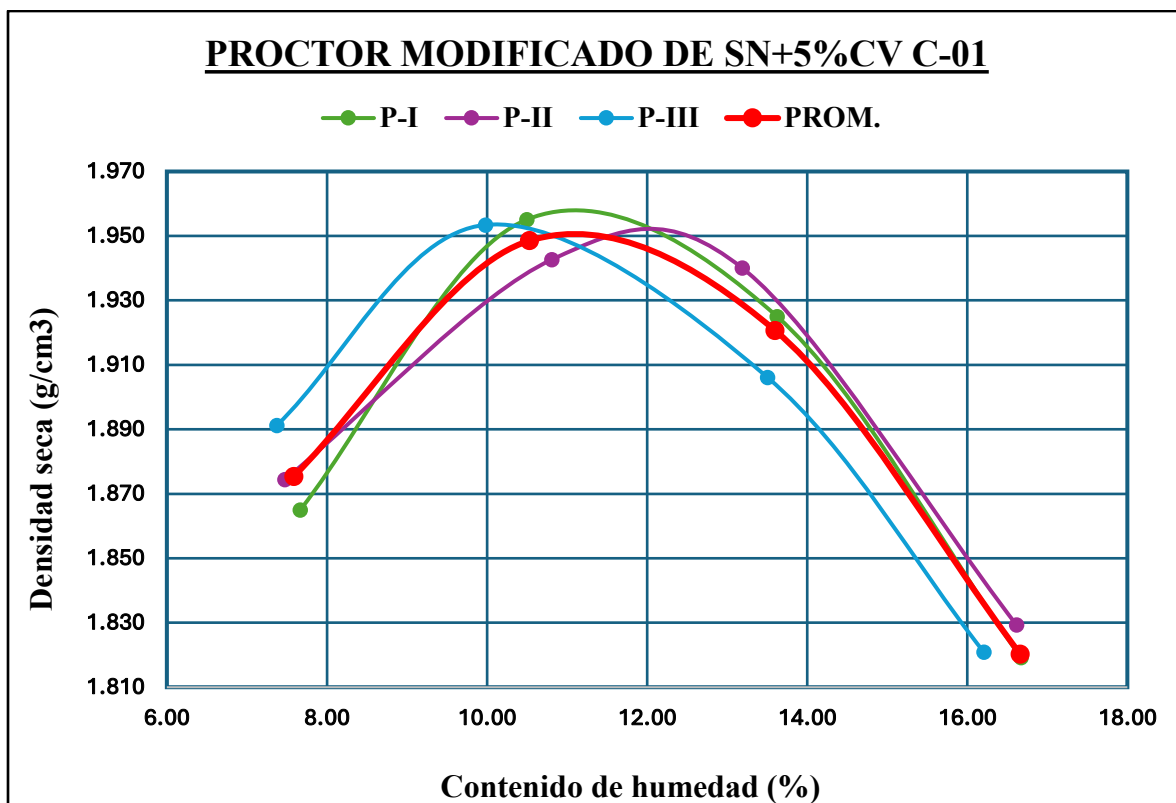


Gráfico 14. Resultados de Proctor modificado de SN+5%CV C-01

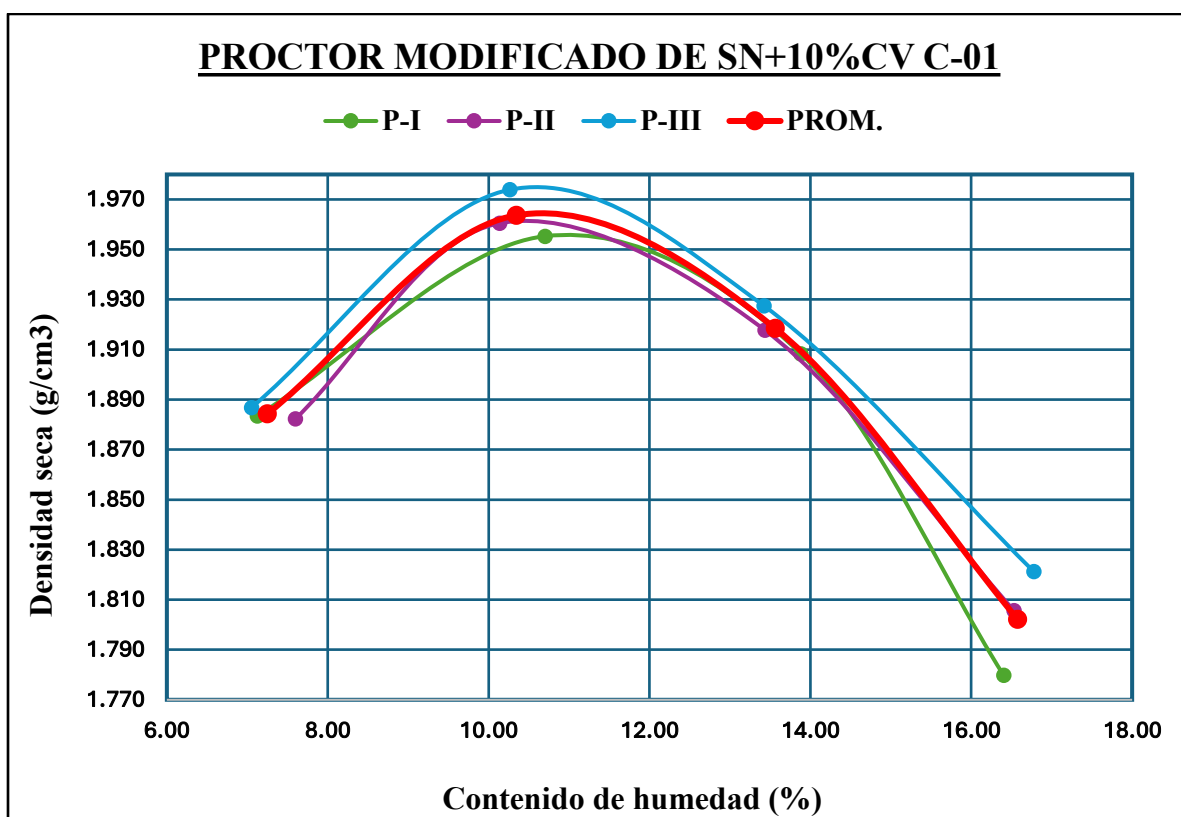


Gráfico 15. Resultados de Proctor modificado de SN+10%CV C-01

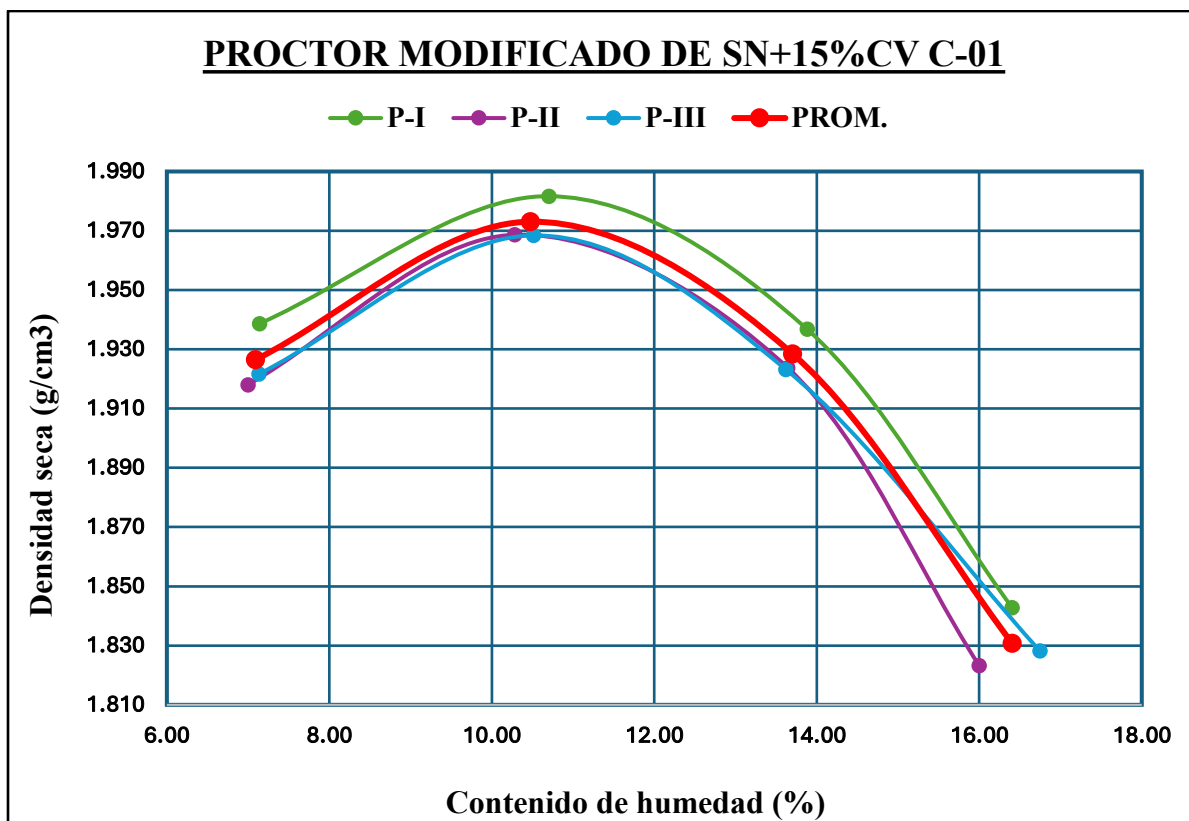


Gráfico 16. Resultados de Proctor modificado SN+15%CV C-01

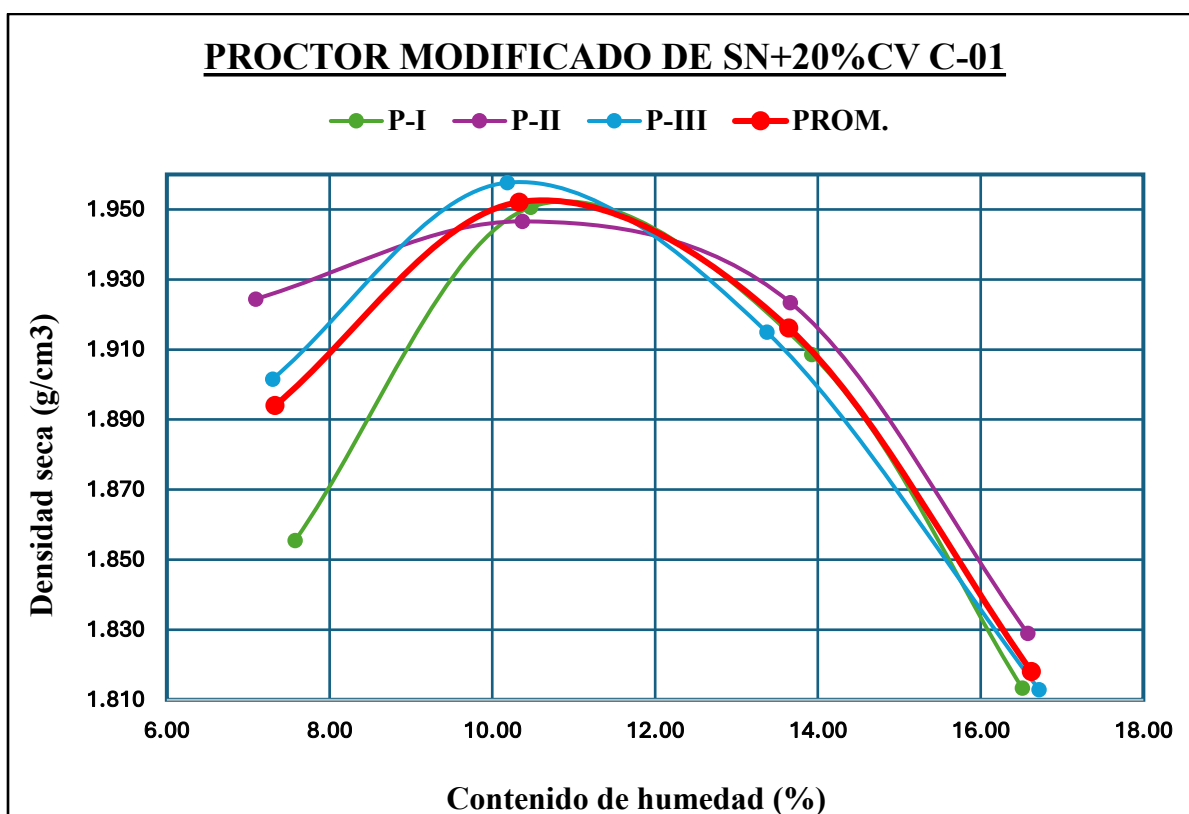


Gráfico 17. Resultados de Proctor modificado SN+20%CV C-01

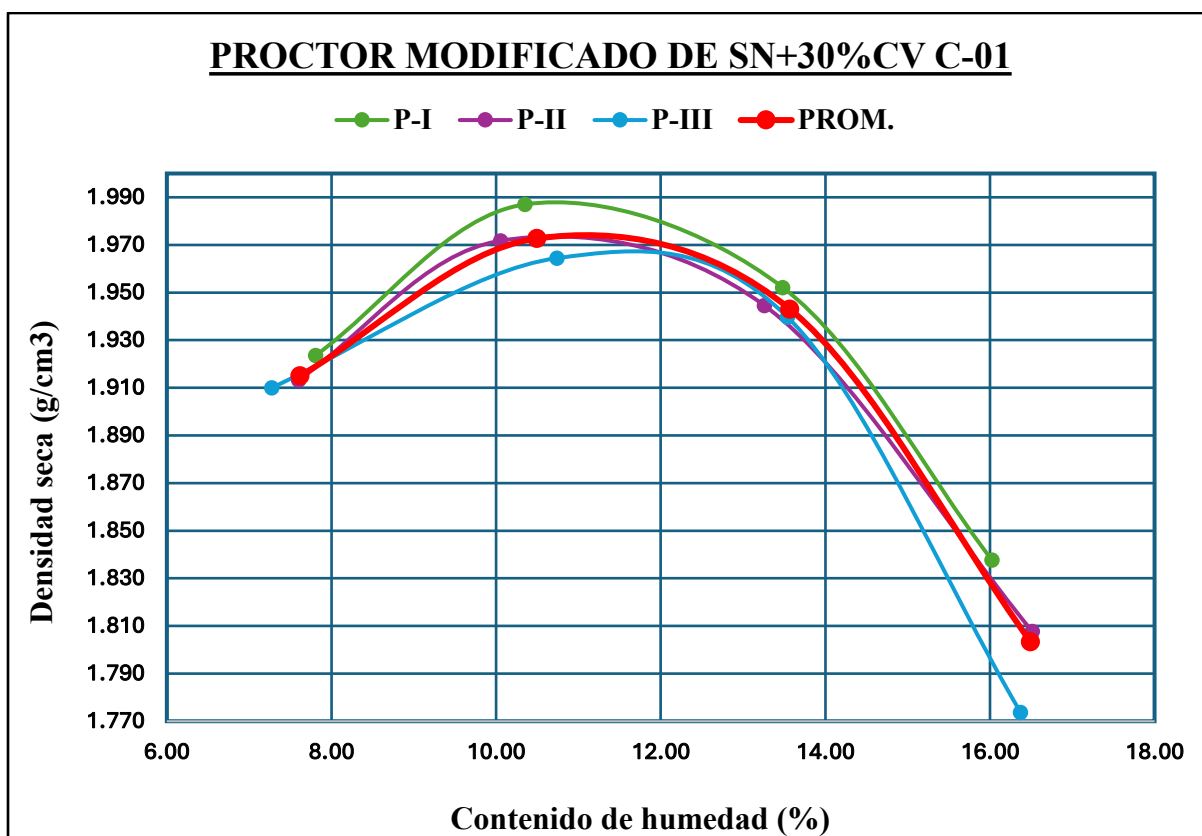


Gráfico 18. Resultados de Proctor modificado SN+30%CV C-01

TABLA XLI.

RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+CV C-01

CALICATA 01	MDS _(PROMEDIO)	OCH _(PROMEDIO)
SN+0%CV	1,935 gr/cm ³	10,60%
SN+5%CV	1,950 gr/cm ³	11,30%
SN+10%CV	1,964 gr/cm ³	10,70%
SN+15%CV	1,973 gr/cm ³	10,80%
SN+20%CV	1,953 gr/cm ³	10,80%
SN+30%CV	1,975 gr/cm ³	11,40%

La TABLA XLI presenta los resultados promedio del ensayo de Proctor Modificado para la Calicata 01, mostrando cómo la incorporación de ceniza volcánica (CV) afecta tanto la máxima densidad seca (MDS) como el contenido óptimo de humedad (OCH) del suelo. En su estado natural, sin adición de CV, la densidad máxima seca es de 1.935 gr/cm³ y el contenido óptimo de humedad es de 10.60%. Al agregar un 5% de CV, se observa un ligero aumento en la MDS, que alcanza 1.950 gr/cm³, y el OCH también sube a 11.30%, lo que indica que el suelo mejora su capacidad de compactación, aunque requiere un poco más de humedad.

Con un 10% de CV, la densidad máxima continúa creciendo hasta 1.964 gr/cm^3 , mientras que el contenido óptimo de humedad disminuye a 10.70%, sugiriendo una mejora en las condiciones ideales para compactar el suelo. Al llegar al 15% de CV, la MDS alcanza su punto máximo con 1.973 gr/cm^3 y el OCH se mantiene en 10.80%, señalando que este porcentaje podría ser el más efectivo para equilibrar la densidad y la humedad necesarias. Sin embargo, al aumentar la adición a un 20%, la densidad disminuye un poco a 1.953 gr/cm^3 , manteniendo estable el contenido óptimo de humedad.

Finalmente, con un 30% de CV, la densidad vuelve a subir, llegando al valor más alto registrado, 1.975 gr/cm^3 , acompañado de un aumento en el contenido óptimo de humedad, que llega a 11.40%, el nivel más alto de humedad requerido. Esto indica que, aunque un mayor porcentaje de ceniza volcánica puede favorecer la densidad del suelo, también exige una mayor cantidad de agua para lograr una compactación adecuada. En resumen, estos resultados evidencian que la adición de CV mejora la compactabilidad del suelo, siendo el rango entre 10% y 15% el más eficiente para optimizar sus propiedades físicas.

Resultados para la calicata 02

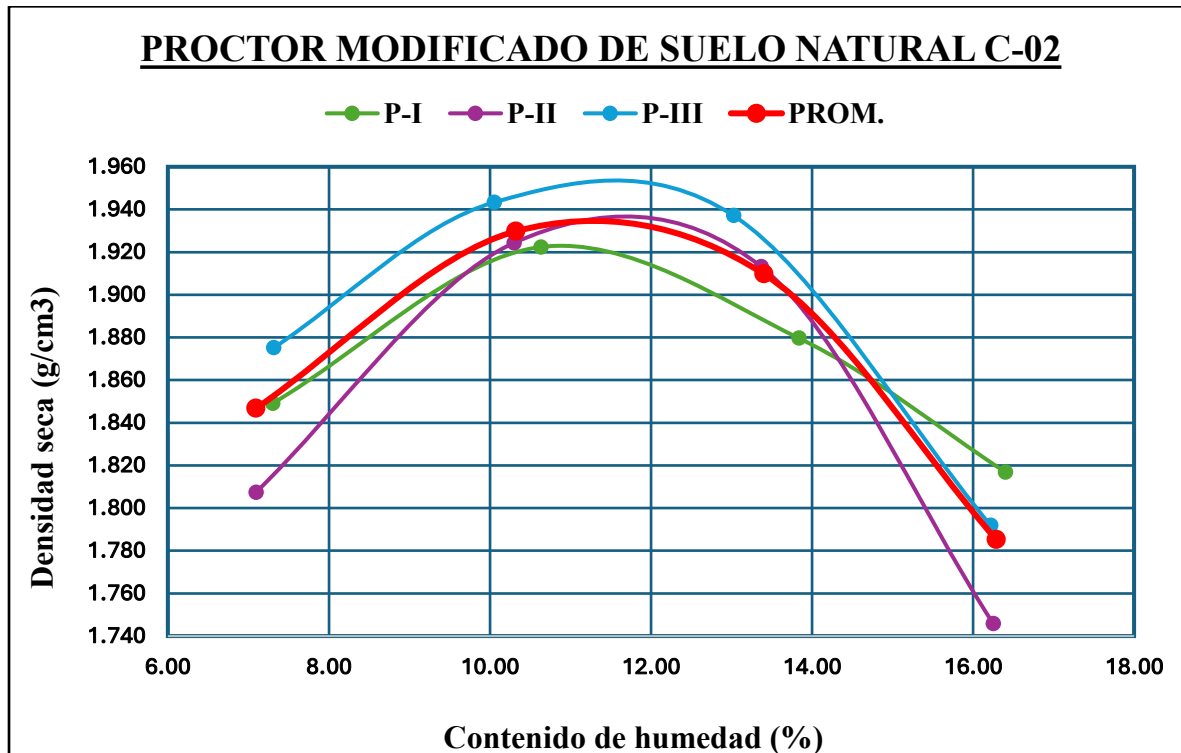


Gráfico 19. Resultados de Proctor modificado SN C-02

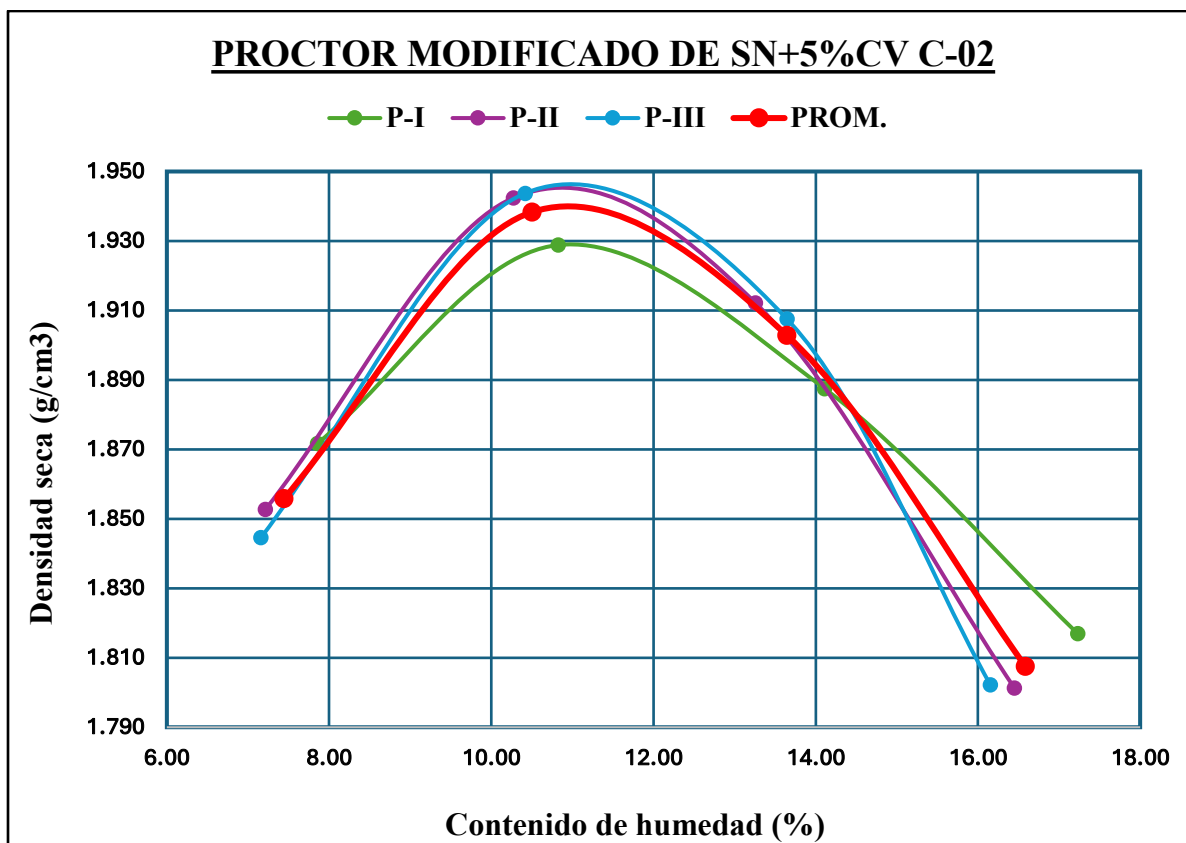


Gráfico 20. Resultados de Proctor modificado SN+5CV C-02

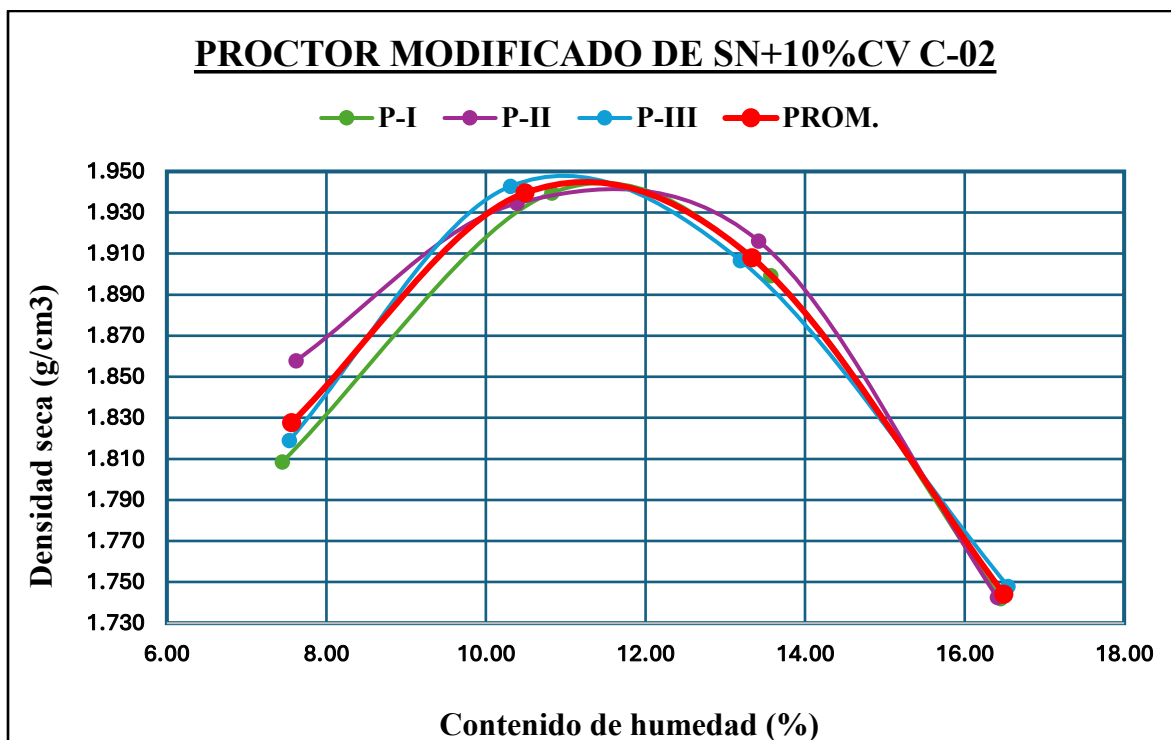


Gráfico 21. Resultados de Proctor modificado SN+10CV C-02

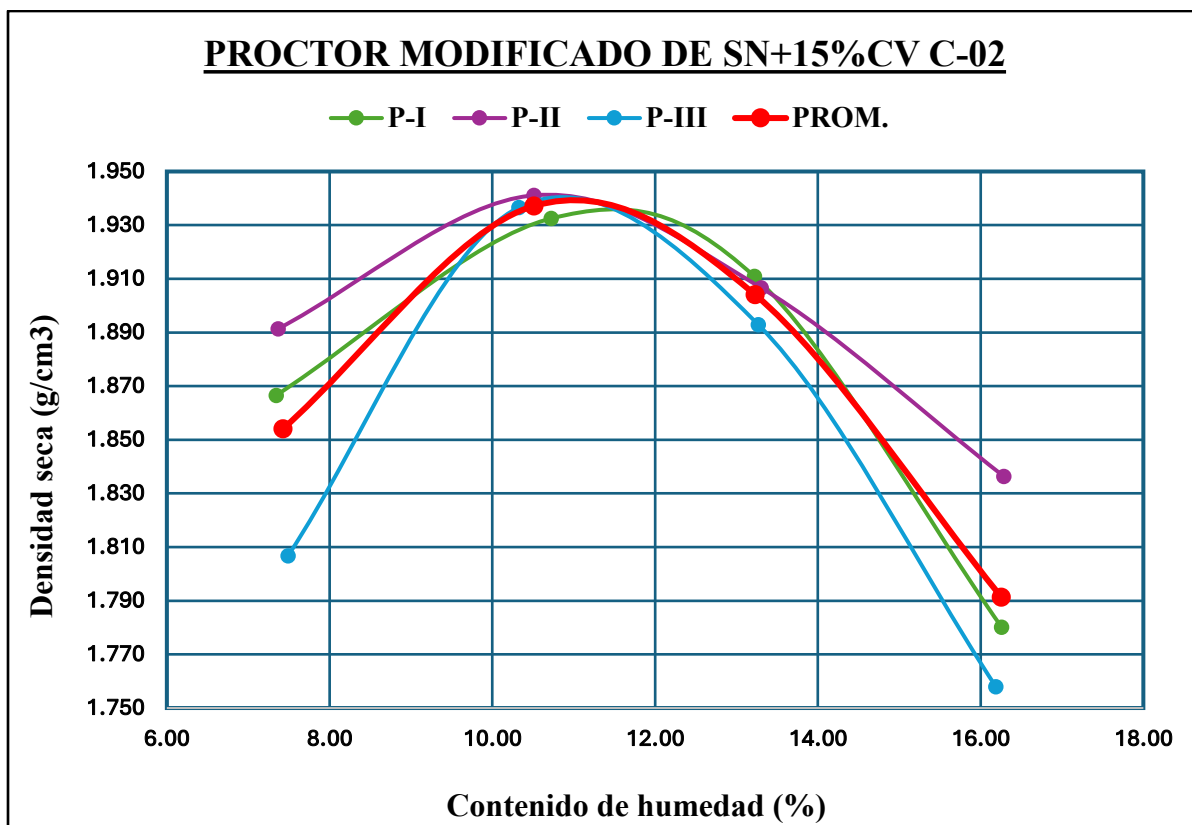


Gráfico 22. Resultados de Proctor modificado SN+15CV C-02

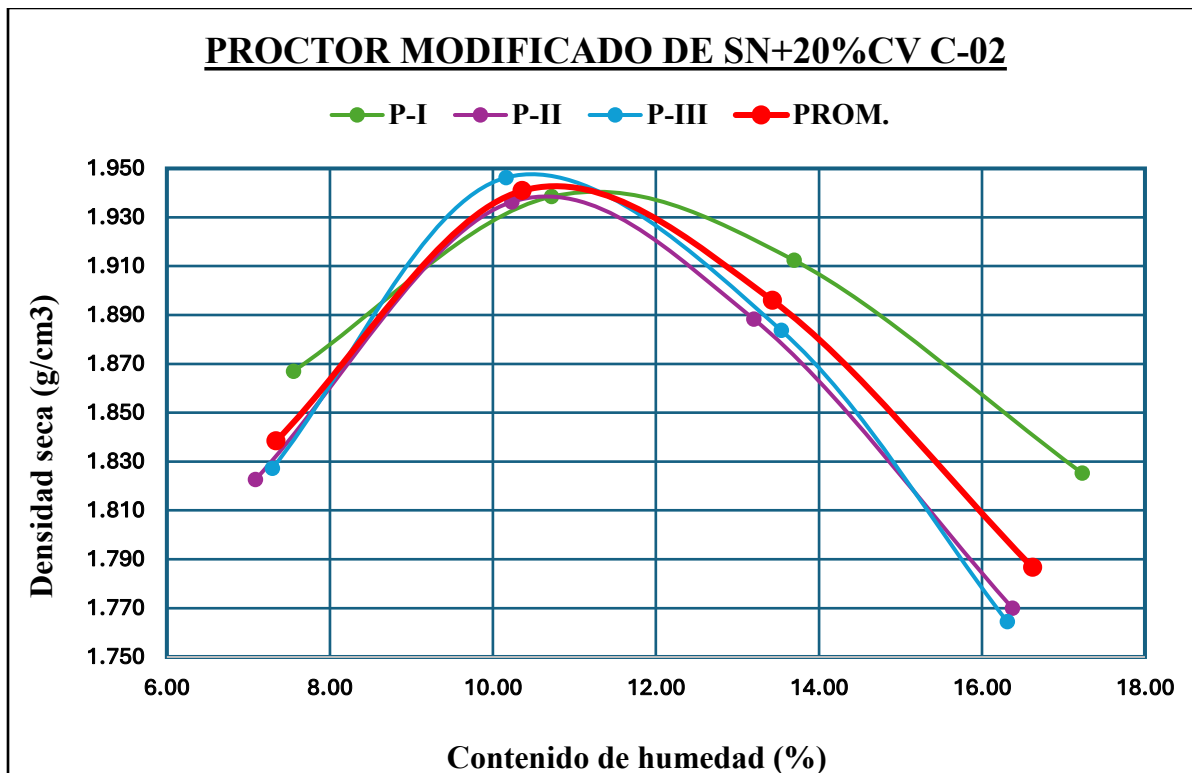


Gráfico 23. Resultados de Proctor modificado SN+20CV C-02

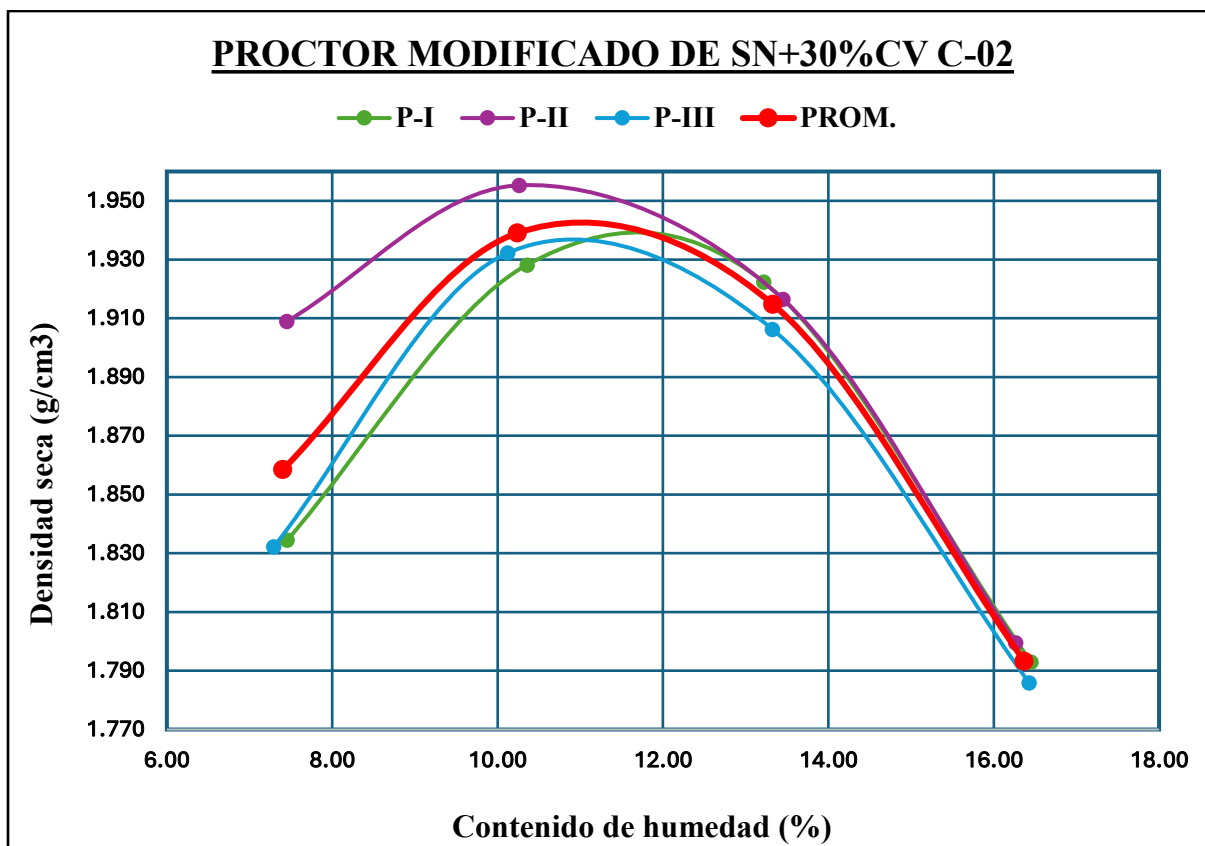


Gráfico 24. Resultados de Proctor modificado SN+30CV C-02

TABLA XLII.

RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+CV C-02

CALICATA 02	MDS _(PROMEDIO)	OCH _(PROMEDIO)
SN+0%CV	1,935 gr/cm ³	11,50%
SN+5%CV	1,940 gr/cm ³	11,00%
SN+10%CV	1,943 gr/cm ³	11,30%
SN+15%CV	1,938 gr/cm ³	10,90%
SN+20%CV	1,942 gr/cm ³	10,80%
SN+30%CV	1,943 gr/cm ³	11,20%

La TABLA XLII presenta los resultados del ensayo de Proctor Modificado para la Calicata 02, evidenciando cómo la incorporación de ceniza volcánica (CV) afecta de forma notable la máxima densidad seca (MDS) y el contenido óptimo de humedad (OCH) del suelo. En su estado natural, sin añadir CV, el suelo muestra una densidad máxima seca de 1.935 gr/cm³ y un contenido óptimo de humedad del 11.50%, reflejando su comportamiento base sin aditivos. Al agregar un 5% de ceniza volcánica, la MDS aumenta ligeramente a 1.940 gr/cm³, mientras que el OCH disminuye a 11.00%, lo que indica que el suelo comienza a compactarse mejor con un menor porcentaje de agua.

Cuando se añade un 10% de CV, la densidad máxima llega a 1.943 gr/cm³ y el contenido óptimo de humedad sube a 11.30%, mostrando un buen balance entre densidad y humedad en este rango. Sin embargo, al aumentar la proporción a un 15%, la MDS baja un poco hasta 1.938 gr/cm³ y el OCH también disminuye a 10.90%, lo que sugiere que la mejora en densidad empieza a estabilizarse en este punto. Al subir al 20% de CV, la densidad máxima vuelve a subir ligeramente a 1.942 gr/cm³, mientras que el contenido óptimo de humedad sigue bajando a 10.80%, manteniendo una tendencia hacia una compactación más eficiente.

Finalmente, con un 30% de CV, la MDS se mantiene estable en 1.943 gr/cm³, aunque el contenido óptimo de humedad vuelve a subir a 11.20%, lo que indica que añadir más aditivo no mejora significativamente la densidad, pero sí requiere un mayor aporte de humedad para compactar correctamente. En términos generales, los resultados muestran que los porcentajes de CV entre 10% y 20% son los más adecuados para optimizar la compactación del suelo.

Resultados para la calicata 03

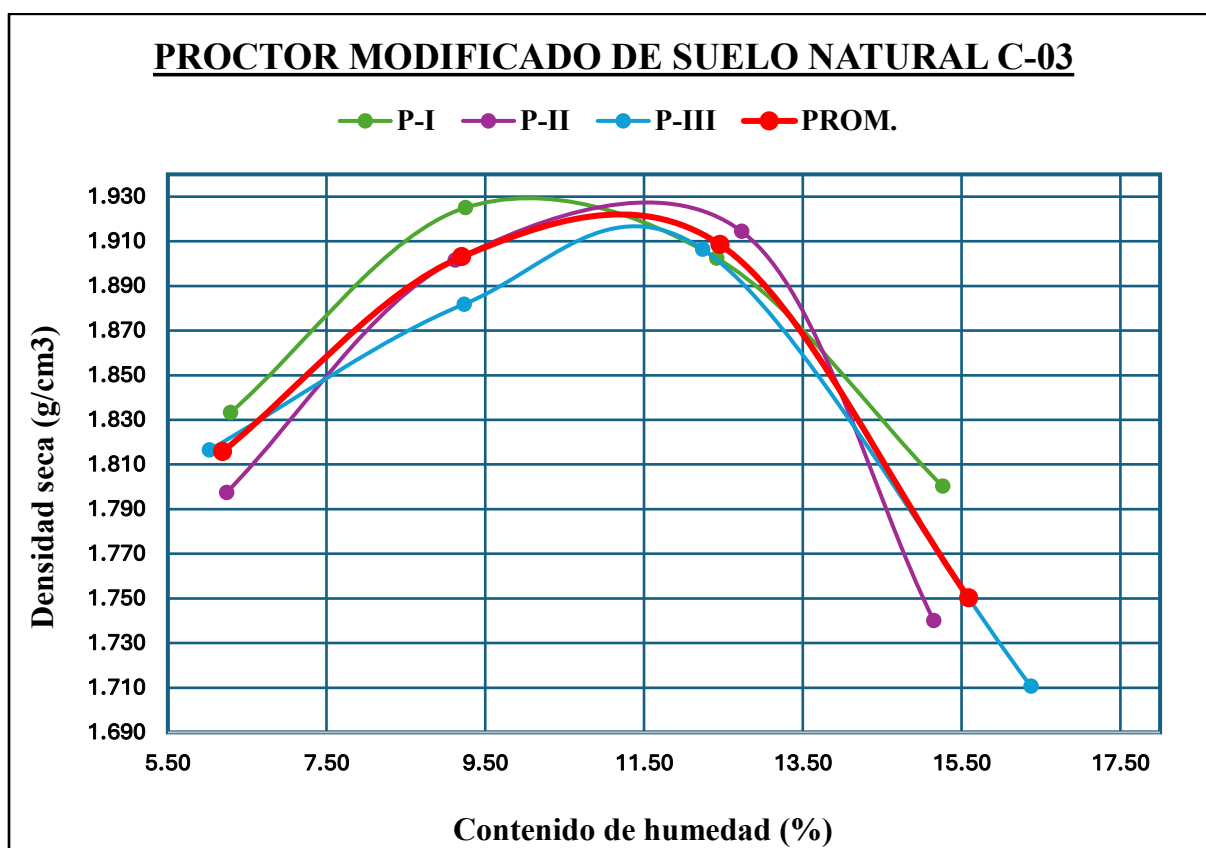


Gráfico 25. Resultados de Proctor modificado SN C-03

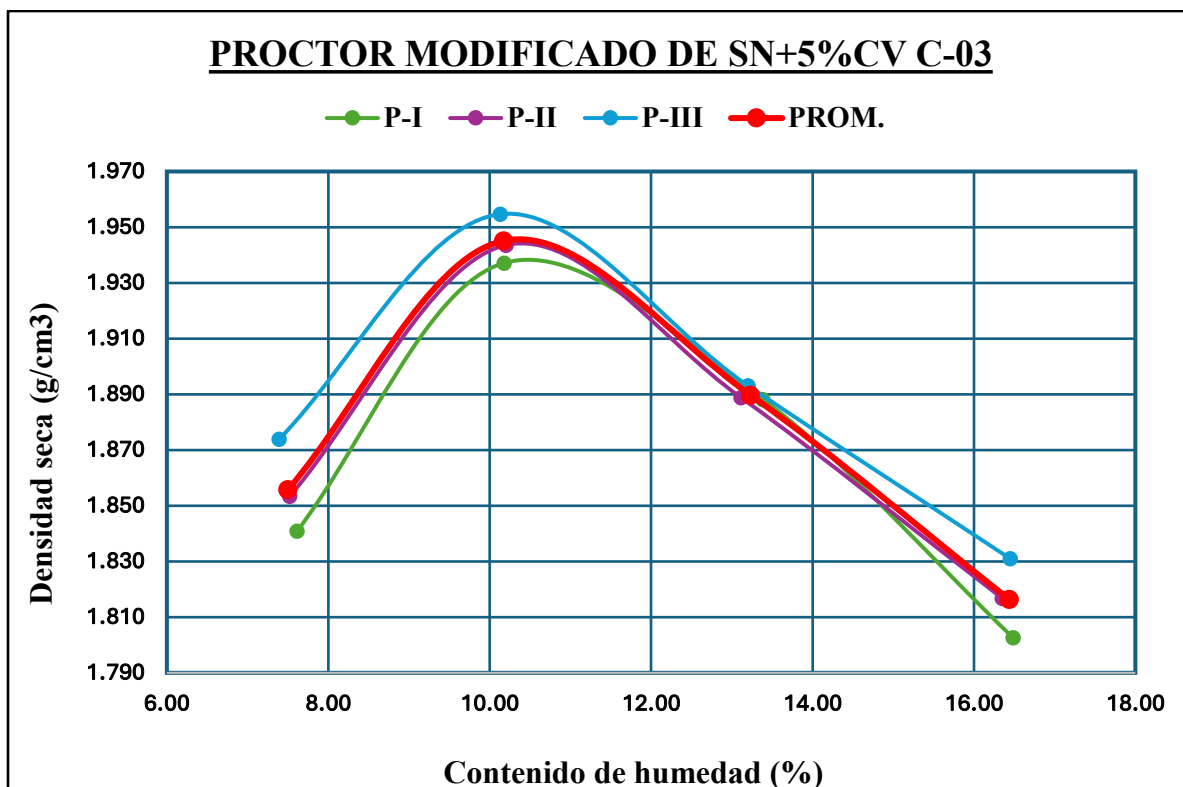


Gráfico 26. Resultados de Proctor modificado SN+5% CV C-03

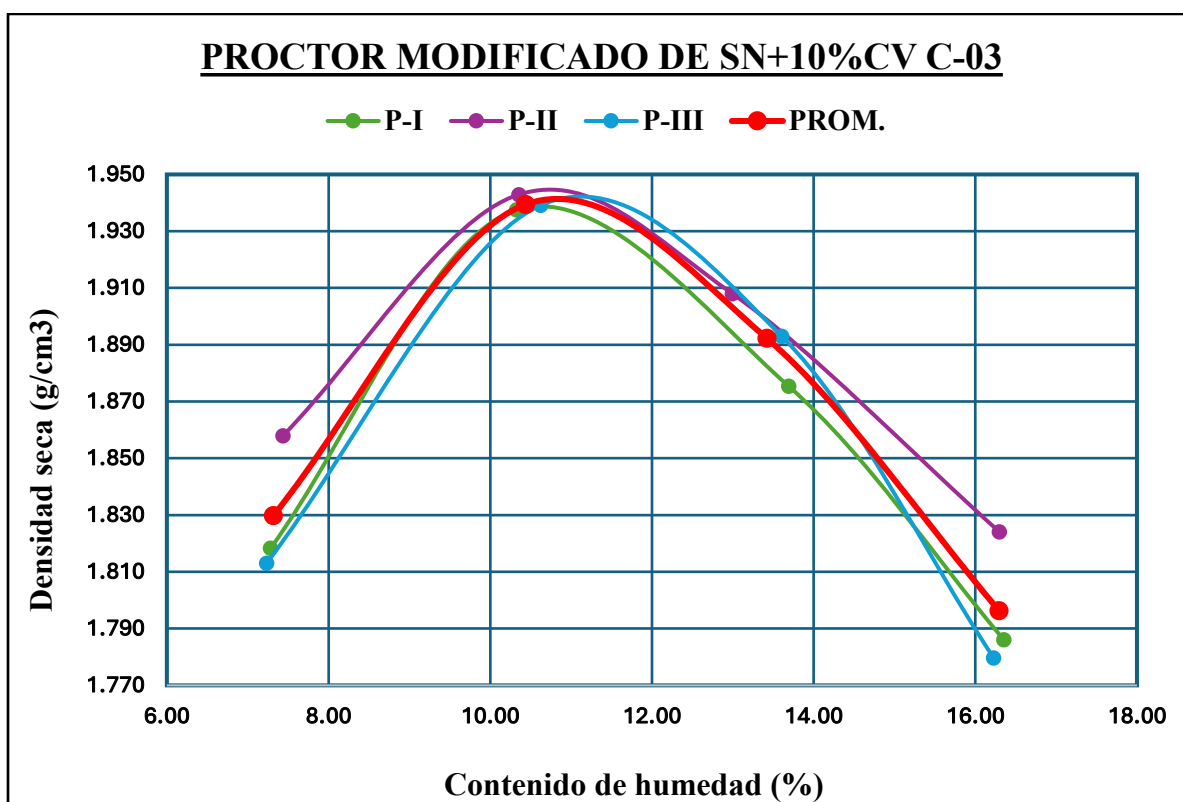


Gráfico 27. Resultados de Proctor modificado SN+10%CV C-03

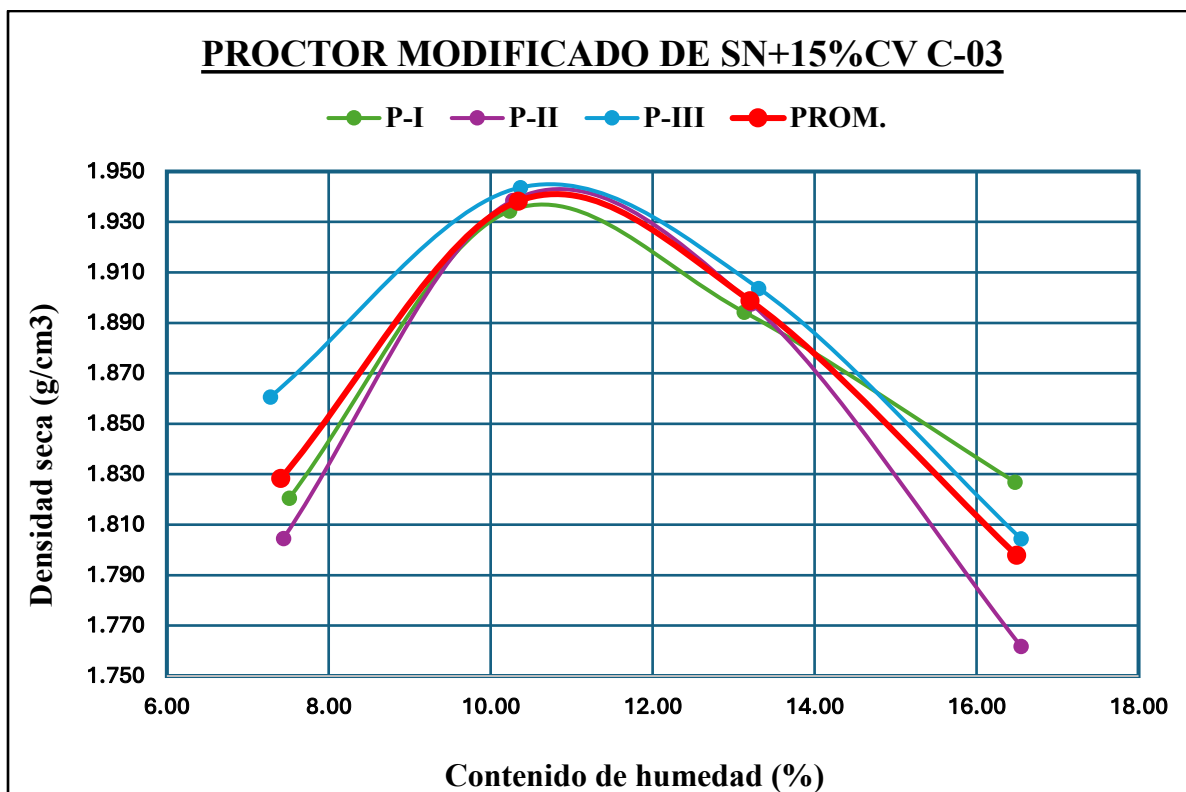


Gráfico 28. Resultados de Proctor modificado SN+15%CV C-03

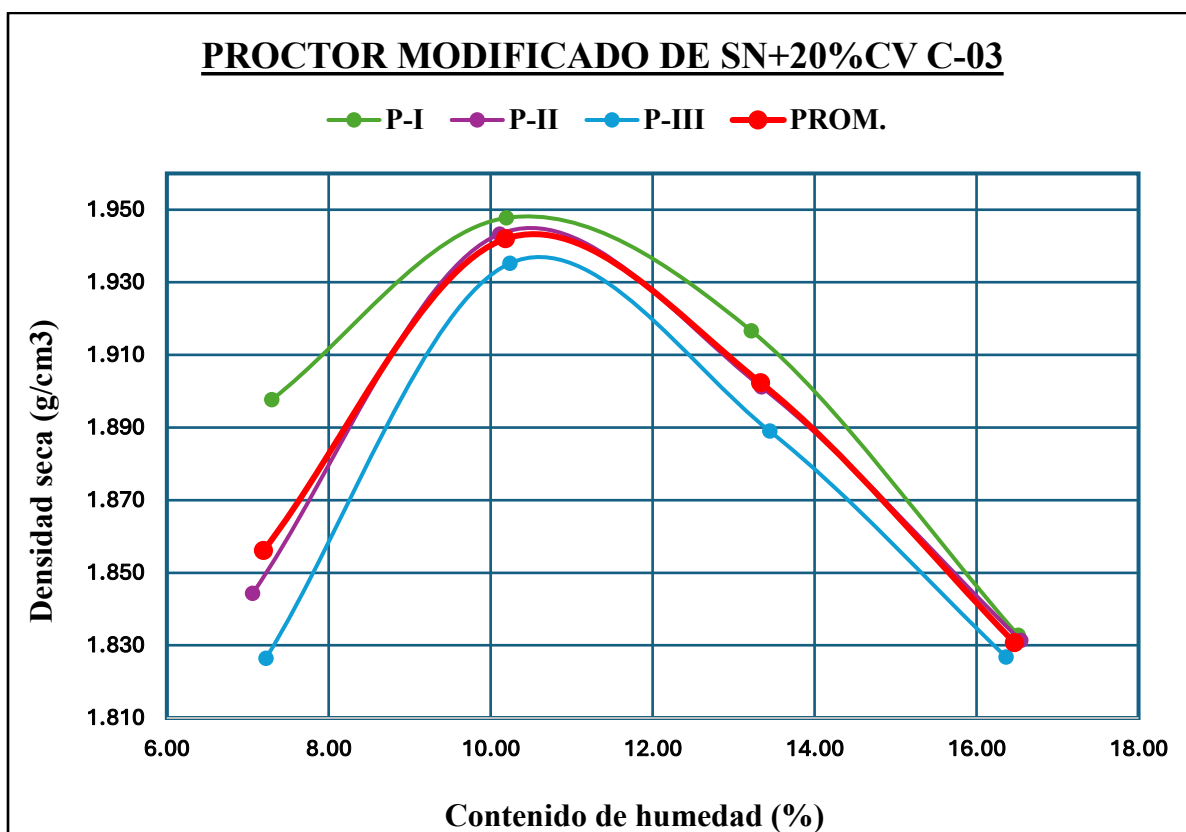


Gráfico 29. Resultados de Proctor modificado de SN+20%CV C-03

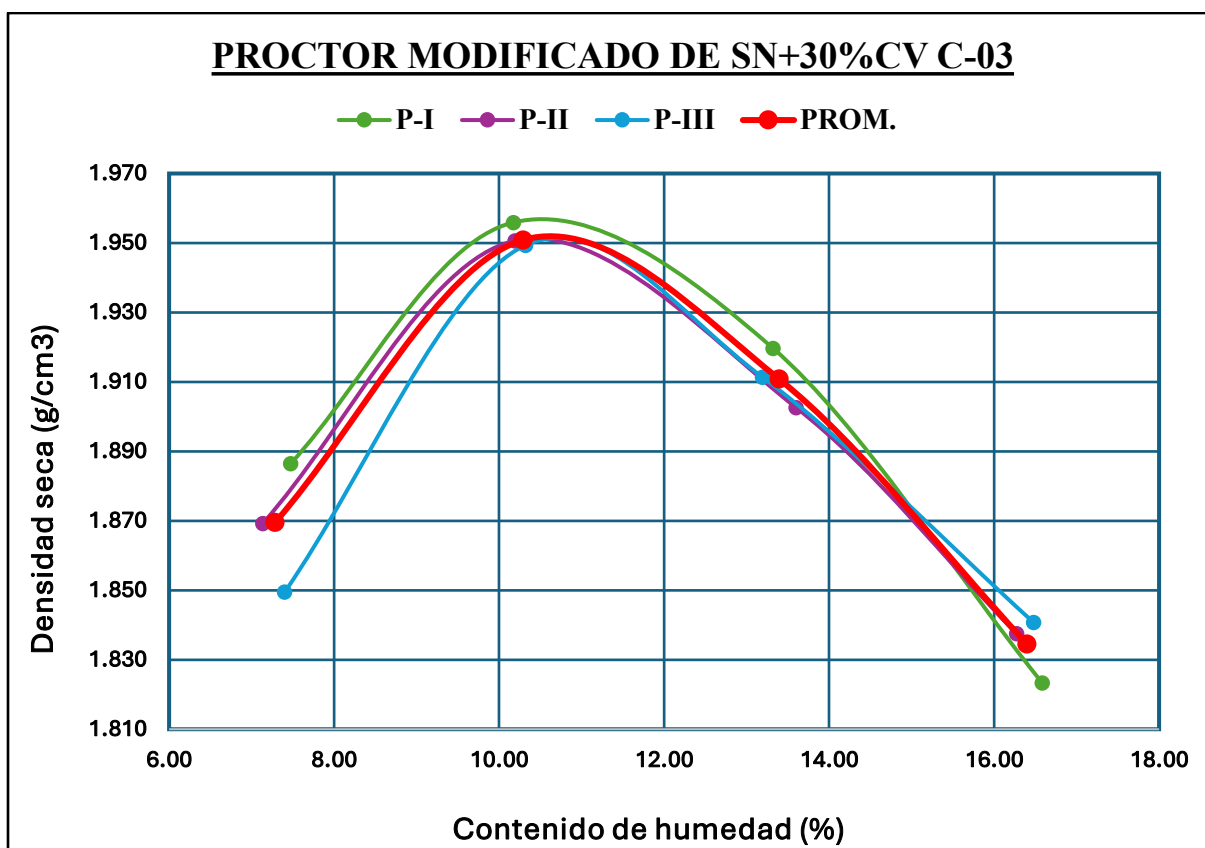


Gráfico 30. Resultados de Proctor modificado de SN+30%CV C-03

TABLA XLIII.

RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO SN+CV C-03

CALICATA 03	MDS _(PROMEDIO)	OCH _(PROMEDIO)
SN+0%CV	1,922 gr/cm ³	11,20%
SN+5%CV	1,945 gr/cm ³	10,40%
SN+10%CV	1,940 gr/cm ³	10,80%
SN+15%CV	1,936 gr/cm ³	10,75%
SN+20%CV	1,942 gr/cm ³	10,50%
SN+30%CV	1,952 gr/cm ³	10,60%

La TABLA LIII presenta los valores promedio obtenidos en el ensayo Proctor Modificado para la calicata 03, mostrando cómo la adición de ceniza volcánica (CV) afecta la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad del suelo. En su estado natural, sin aditivo (0% CV), la densidad seca del suelo es de 1.922 gr/cm³ y el porcentaje de humedad óptima es de 11.20%. Al agregar un 5% de CV, la densidad aumenta notablemente hasta 1.945 gr/cm³, mientras que la humedad óptima disminuye a 10.40%, lo que indica que el suelo mejora su capacidad de compactación y requiere menos agua para lograrlo.

Cuando se añade un 10% de CV, la densidad baja ligeramente a 1.940 gr/cm³ y la humedad óptima sube un poco a 10.80%, reflejando que el suelo sigue manteniendo un buen desempeño en esta proporción. Con un 15% de CV, la densidad desciende un poco más a 1.936 gr/cm³ y la humedad óptima se ajusta a 10.75%, lo que sugiere que las propiedades del suelo comienzan a estabilizarse con esta cantidad de aditivo.

Al aumentar a un 20% de CV, la densidad vuelve a subir a 1.942 gr/cm³ y la humedad óptima disminuye a 10.50%, mostrando que este nivel de ceniza favorece una compactación eficiente. Finalmente, con un 30% de CV, se alcanza la mayor densidad seca, 1.952 gr/cm³, junto con una humedad óptima de 10.60%, evidenciando que el suelo puede lograr una excelente compactación incluso con porcentajes altos de aditivo.

Ensayo de CBR en laboratorio

Después de calcular los valores promedio de la Máxima Densidad Seca (MDS) y el Contenido Óptimo de Humedad (OCH) para cada calicata, tanto en su estado natural como con distintos porcentajes de ceniza volcánica (CV) añadida, se procede a la siguiente fase del estudio: la realización del ensayo de CBR (California Bearing Ratio) en el laboratorio.

Este ensayo comienza con la prueba en las muestras de suelo en su estado natural. Para asegurar la precisión y confiabilidad de los resultados, se realizan cinco repeticiones por cada calicata, siguiendo los criterios de selección y muestreo previamente establecidos en capítulos anteriores. Estas repeticiones no solo permiten obtener un promedio representativo, sino que también ayudan a detectar posibles variaciones propias de las características del suelo.

Este método cuidadoso es clave, ya que el ensayo CBR mide directamente la resistencia del suelo a la penetración, y cualquier cambio en las condiciones del suelo, ya sea natural o tratado, puede influir en las recomendaciones para su uso. Contar con datos confiables de ambos estados, con y sin la adición de CV, permitirá evaluar con claridad el impacto del estabilizante en la capacidad del suelo para soportar cargas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de este ensayo.

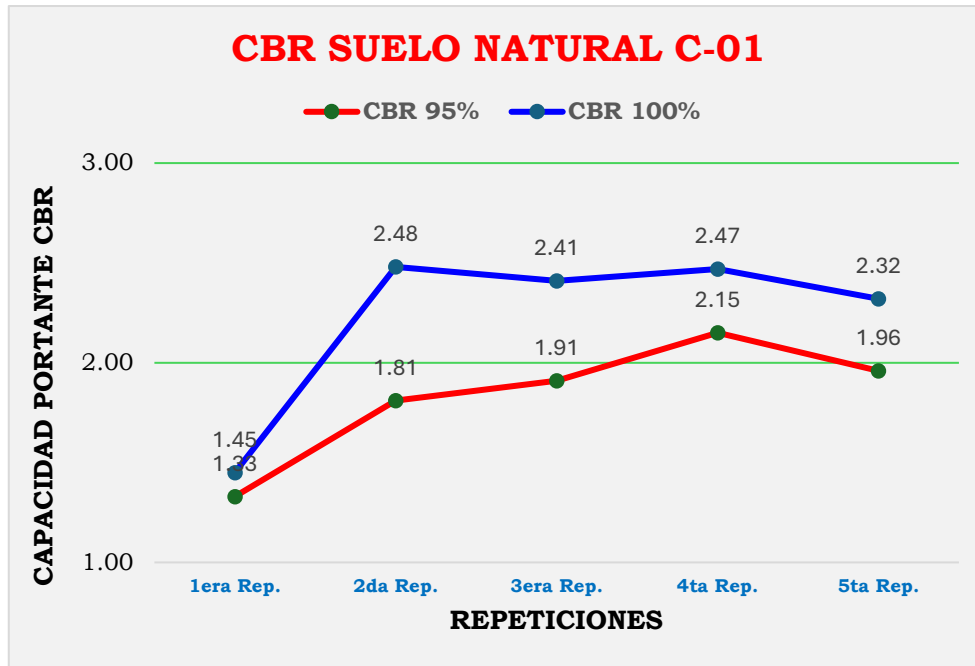


Gráfico 31. Resultados de CBR natural C-01

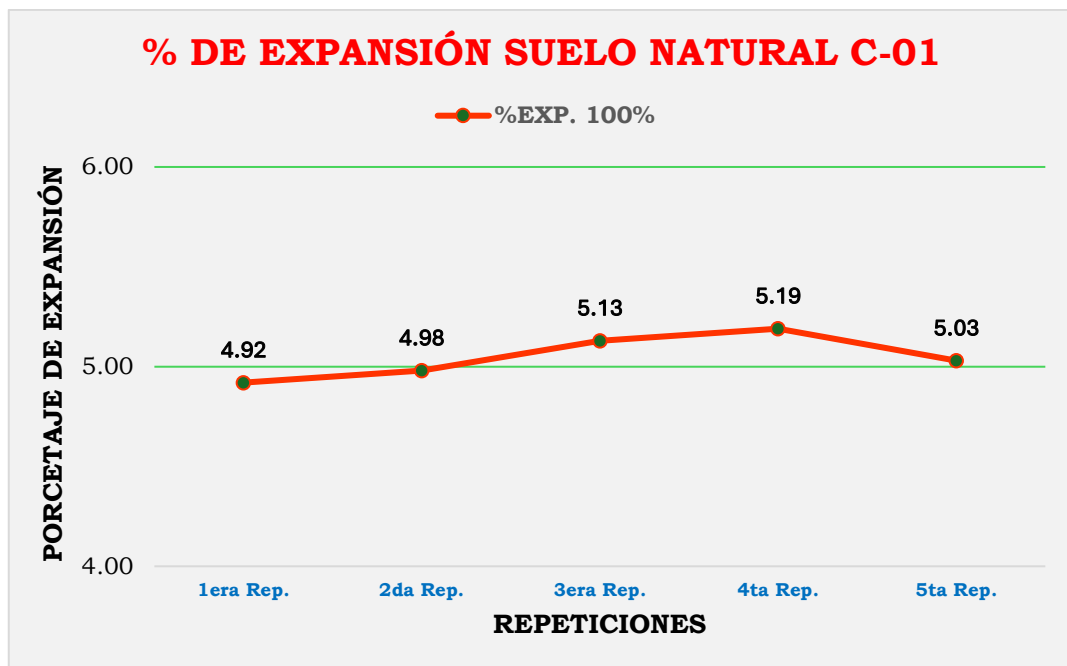


Gráfico 32. Resultados de expansión suelo natural C-01

TABLA XLIV.
RESULTADOS DEL CBR NATURAL C-01

CALICATA 01	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	1.33	1.45	4.92
2da Rep.	1.81	2.48	4.98
3era Rep.	1.91	2.41	5.13
4ta Rep.	2.15	2.47	5.19
5ta Rep.	1.96	2.32	5.03

En la tabla se presentan los resultados obtenidos del ensayo CBR realizado a dos niveles de compactación (95% y 100% del Proctor Modificado) junto con los valores de expansión correspondientes para la Calicata 01. Los valores de CBR al 95% se encuentran entre 1.33% y 2.15%, mientras que al 100% van desde 1.45% hasta 2.48%. Estos resultados indican que el suelo, en su condición natural, tiene una baja capacidad de soporte, lo que lo clasifica como un material de muy mala calidad para ser usado en estructuras de pavimento.

Por otro lado, los porcentajes de expansión se sitúan entre 4.92% y 5.19%, superando claramente el límite máximo permitido por normas técnicas como las del MTC, que establece un valor máximo de 2%. Esta expansión considerable al entrar en contacto con la humedad señala posibles riesgos de inestabilidad si el suelo no es tratado adecuadamente.

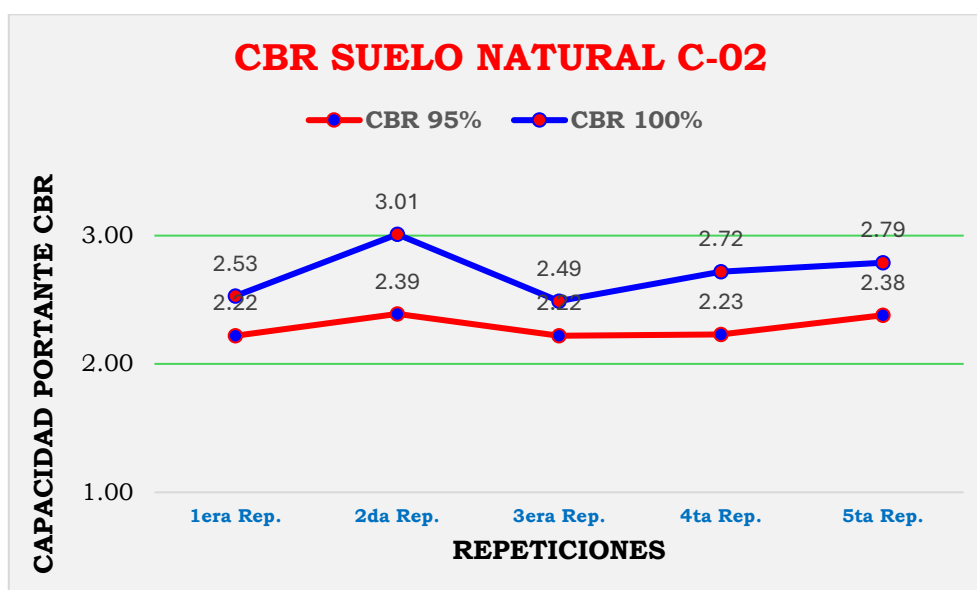


Gráfico 33. Resultados de CBR natural C-02

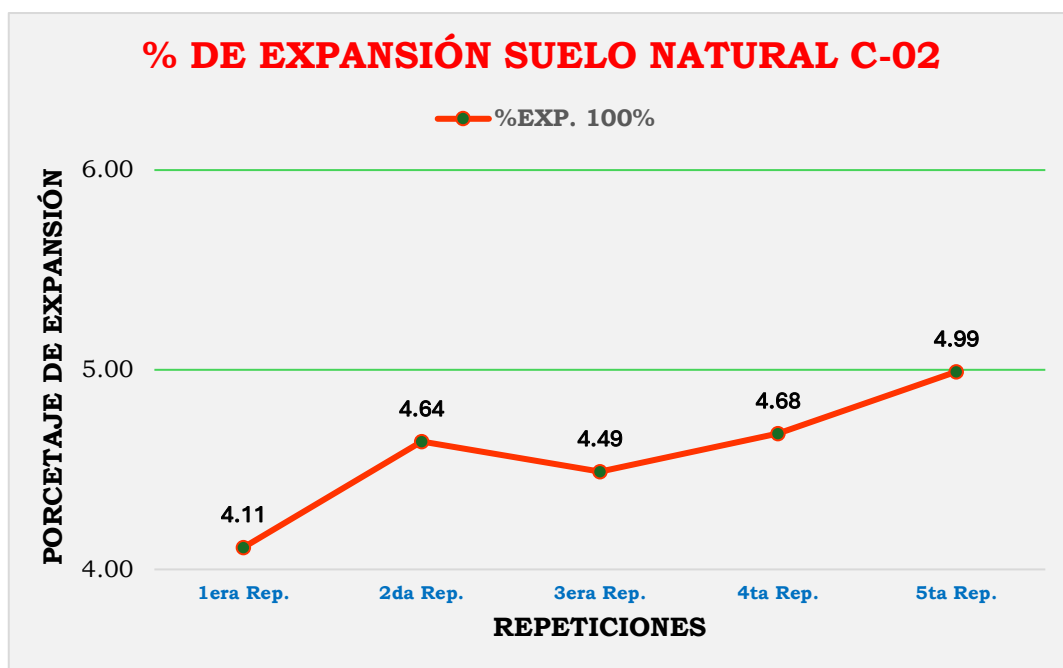


Gráfico 34. Resultados de expansión suelo natural C-02

TABLA XLV. RESULTADOS DEL CBR NATURAL C-02

CALICATA 02	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	2.22	2.53	4.11
2da Rep.	2.39	3.01	4.64
3era Rep.	2.22	2.49	4.49
4ta Rep.	2.23	2.72	4.68
5ta Rep.	2.38	2.79	4.99

La TABLA XLV muestra los hallazgos del ensayo CBR al 95% y 100% de la Proctor Modificada, junto con el porcentaje de expansión correspondiente a la Calicata 02, ponen de manifiesto un suelo con capacidad portante reducida y alta expansividad. Los valores de resistencia a las cargas (CBR) al 95% oscilan entre 2.22% y 2.39%, mientras que al 100% se sitúan entre 2.49% y 3.01%. Esto sugiere que el suelo exhibe una resistencia restringida a las cargas, permaneciendo dentro de la categoría de suelos no aptos para subrasantes sin tratamiento. Adicionalmente, el porcentaje de expansión oscila entre 4.11% y 4.99%, superando el límite establecido por la normativa técnica del MTC ($\leq 2\%$), lo que indica una tendencia notable hacia la expansión al interactuar con el agua. Estos hallazgos subrayan la imperatividad de estabilizar este tipo de suelo para asegurar un rendimiento estructural óptimo en proyectos de pavimentación.

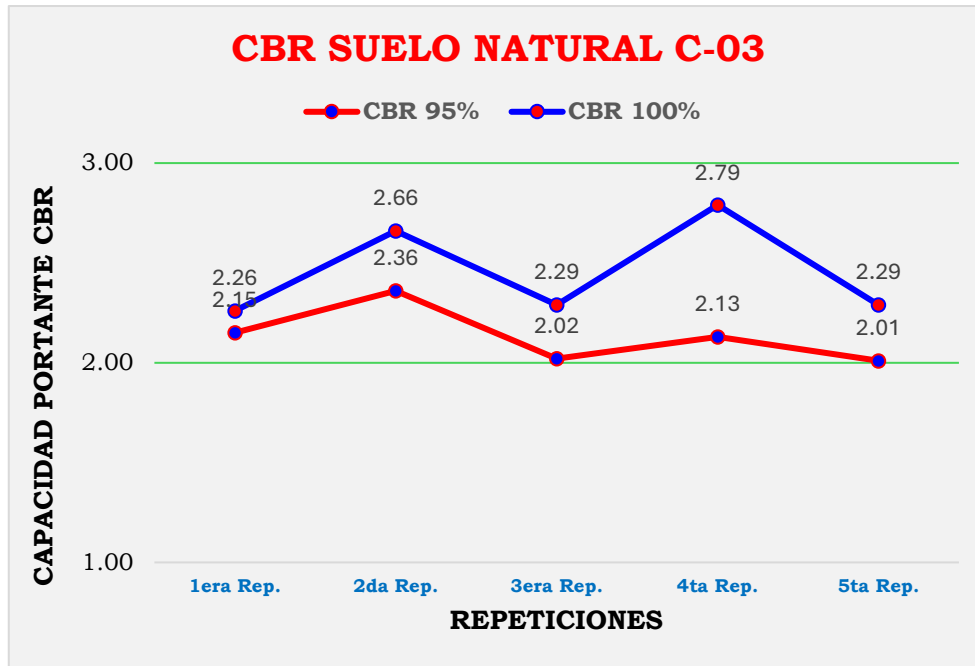


Gráfico 35. Resultados de CBR natural C-03

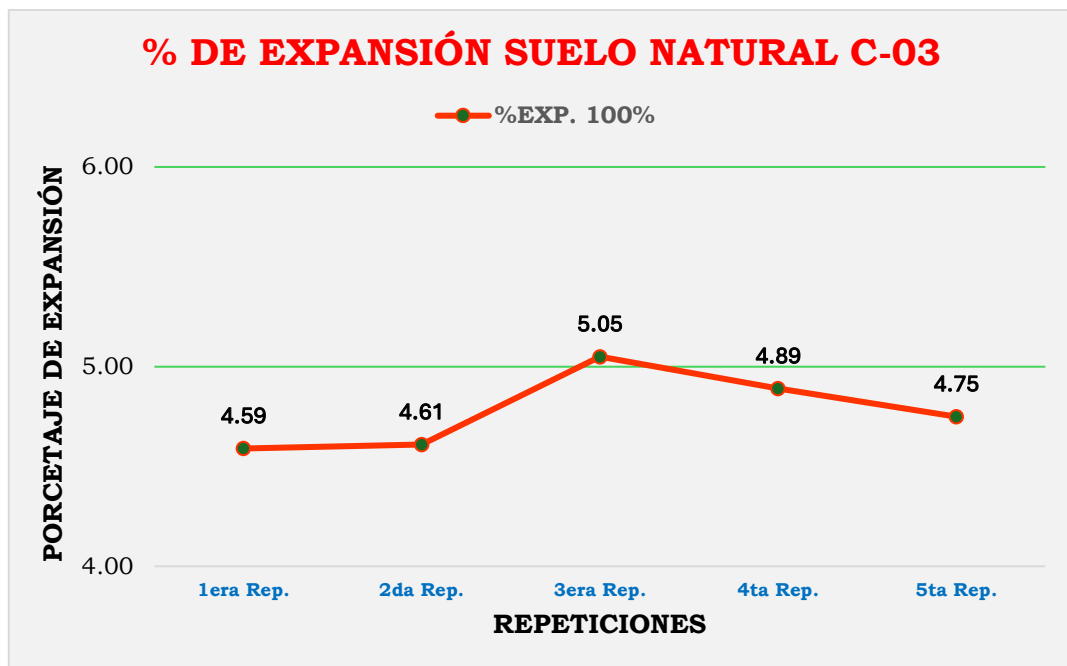


Gráfico 36. Resultados de expansión suelo natural C-03

TABLA XLVI. RESULTADOS DEL CBR NATURAL C-03

CALICATA 03	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	2.15	2.26	4.59
2da Rep.	2.36	2.66	4.61
3era Rep.	2.02	2.29	5.05
4ta Rep.	2.13	2.79	4.89
5ta Rep.	2.01	2.29	4.75

La TABLA XLVI muestra los hallazgos del ensayo CBR al 95% y 100% de la Proctor Modificada, junto con el porcentaje de expansión correspondiente a la Calicata 03, señalan que el suelo exhibe una resistencia mecánica reducida y una elevada susceptibilidad a las expansiones. Según el Manual de Carreteras del MTC, los valores de CBR al 95% fluctúan entre el 2.01% y el 2.36%, mientras que al 100% se sitúan entre el 2.26% y el 2.79%. Esto clasifica a este material dentro de la categoría de suelos con una capacidad portante extremadamente baja, lo que resulta inadecuado para subrasantes sin un tratamiento previo. Respecto al porcentaje de expansión, este oscila entre el 4.59% y el 5.05%, superando considerablemente el límite máximo permitido del 2%, lo que demuestra un comportamiento altamente expansivo al interactuar con el agua. Esta circunstancia constituye un peligro para la durabilidad y estabilidad de las estructuras de transporte, intensificando la necesidad de implementar técnicas de estabilización para optimizar su comportamiento geotécnico.

Resultados de CBR con adición

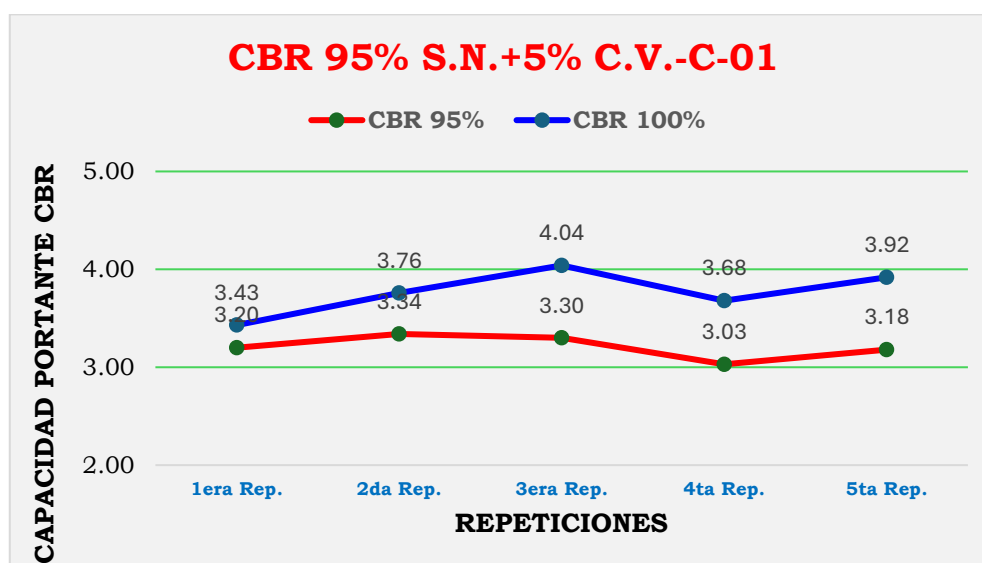


Gráfico 37. Resultados de CBR 95% S.N. + 5% C.V. – C-01

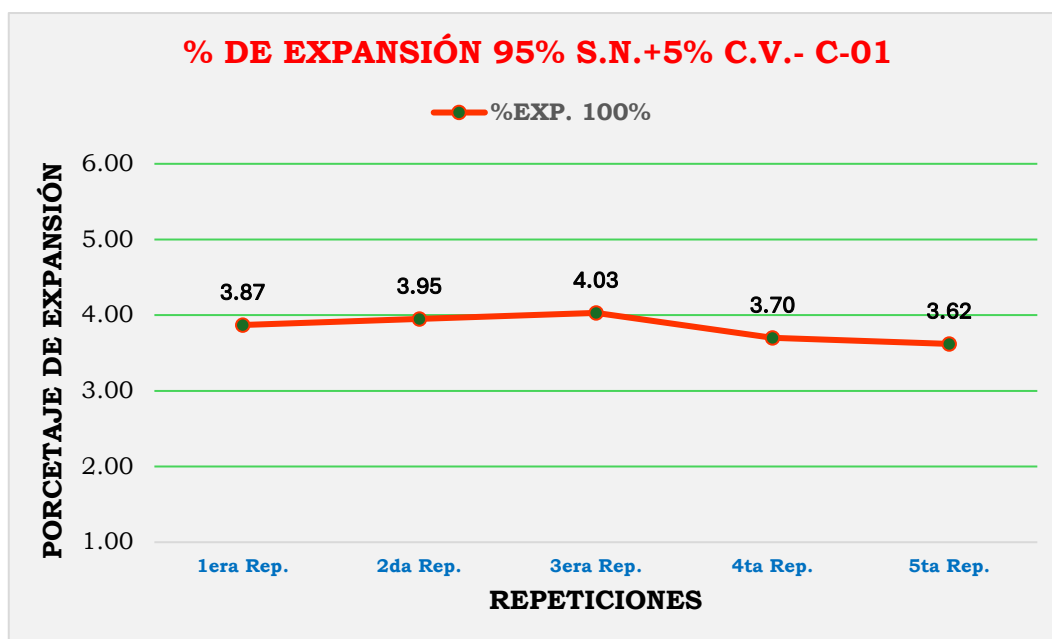


Gráfico 38. Resultado de expansión 95% SN + 5% CV - C01

TABLA XLVII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 95% S.N.+5% C.V.-C-01

CALICATA 01	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	3.20	3.43	3.87
2da Rep.	3.34	3.76	3.95
3era Rep.	3.30	4.04	4.03
4ta Rep.	3.03	3.68	3.70
5ta Rep.	3.18	3.92	3.62

La Tabla XLVII presenta los resultados del CBR al 95% y 100% del Proctor Modificado con la adición del 5% de ceniza volcánica en la Calicata 01, evidenciando una mejora moderada en la resistencia del suelo. Los valores de CBR fluctúan entre el 3.03% y el 3.34% al 95% de compactación, y entre el 3.43% y el 4.04% al 100%. Estos valores son superiores a los del suelo natural, pero aún por debajo del mínimo requerido por el Método Técnico Común para Subrasantes. El índice de expansión oscila entre el 3.62% y el 4.03%, lo que refleja una disminución marginal en comparación con el valor inicial (5%), aunque continúa excediendo el límite permitido del 2%, lo que sugiere que el suelo necesita un tratamiento adicional para su utilización en vías.

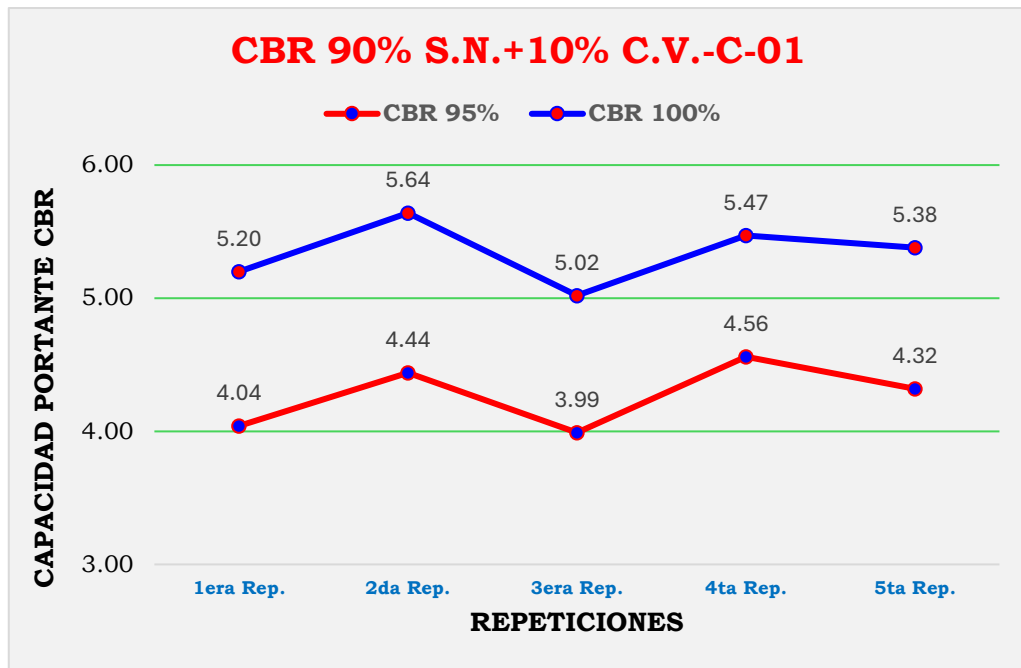


Gráfico 39. Resultados de CBR 90% S.N.+10% C.V. – C-01

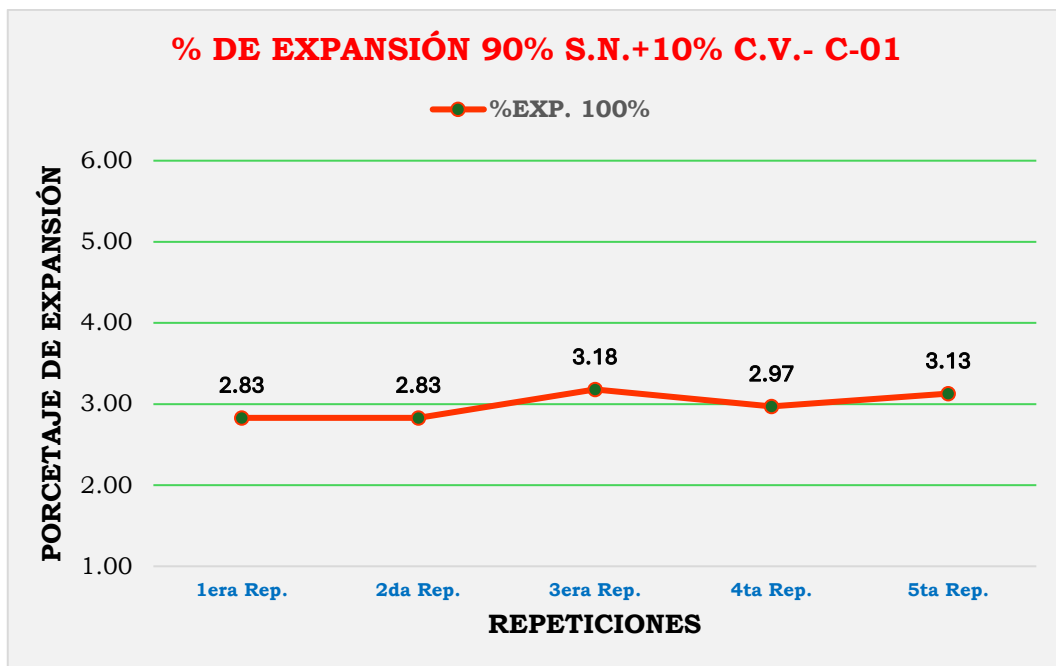


Gráfico 40. Resultados de expansión 90% SN+10% CV – C-01

**TABLA XLVIII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 90% S.N.+10%
C.V.-C-01**

CALICATA 01	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	4.04	5.20	2.83
2da Rep.	4.44	5.64	2.83
3era Rep.	3.99	5.02	3.18
4ta Rep.	4.56	5.47	2.97
5ta Rep.	4.32	5.38	3.13

La Tabla XLVIII muestra los hallazgos del ensayo CBR al 95% y 100% de la Proctor Modificada en la Calicata 01, añadiendo un 10% de ceniza volcánica, lo que demuestra una mejora notable en la capacidad portante del suelo. Los niveles de CBR al 95% se sitúan en el rango de 3.99% a 4.56%, mientras que al 100% se sitúan entre 5.02% y 5.64%, superando considerablemente los valores documentados en el suelo natural. El porcentaje de expansión oscila entre el 2.83% y el 3.18%, evidenciando una disminución significativa en comparación con el valor inicial (5%), aproximando al límite permitido del 2%. Estos hallazgos señalan un avance significativo en la estabilización del suelo, aunque se recomienda continuar con las modificaciones para satisfacer plenamente los requisitos normativos del Ministerio de Trabajo y Comunidad.

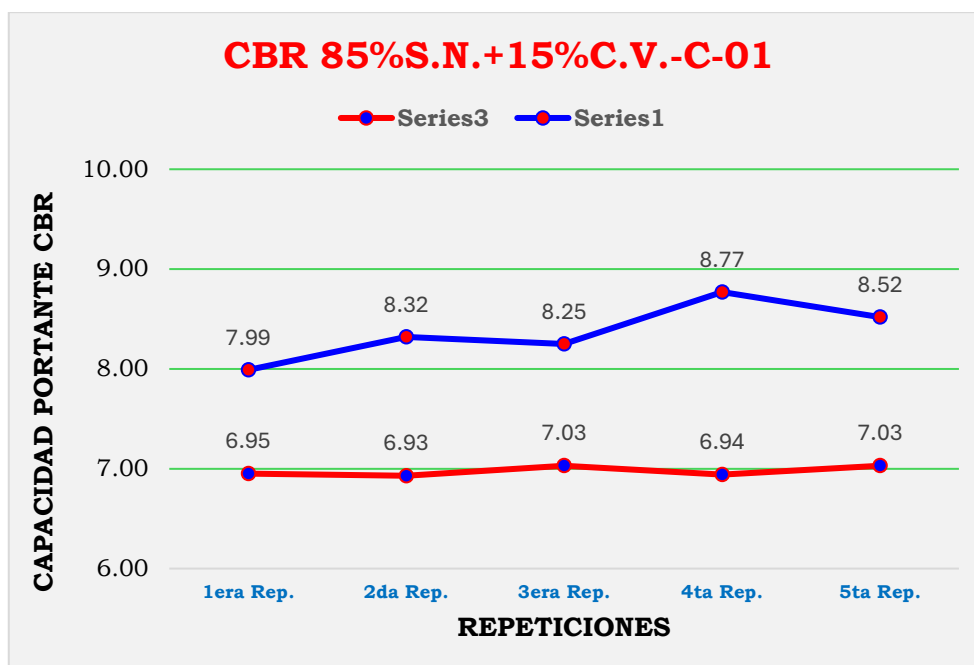


Gráfico 41. Resultados de CBR 85% S.N.+15% C.V. – C-01

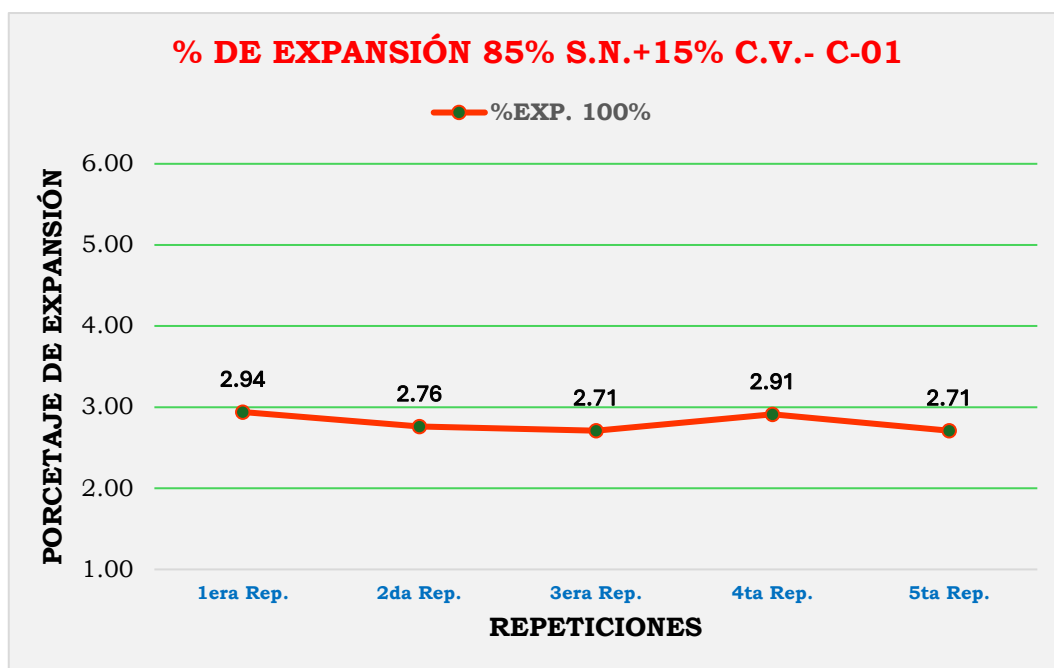


Gráfico 42. Resultados de expansión 85% SN+15% CV – C-01

TABLA XLIX. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 85% SN+ 15% CV. C-01

CALICATA 01	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	6.95	7.99	2.94
2da Rep.	6.93	8.32	2.76
3era Rep.	7.03	8.25	2.71
4ta Rep.	6.94	8.77	2.91
5ta Rep.	7.03	8.52	2.71

La Tabla XLIX presenta los hallazgos del ensayo CBR al 95% y 100% de Proctor Modificado en la Calicata 01, con una adición del 15% de ceniza volcánica, lo que demuestra una mejora significativa en la resistencia del terreno. Los valores de CBR al 95% fluctúan entre 6.93% y 7.03%, mientras que al 100% se sitúan entre 7.99% y 8.77%, lo que evidencia un incremento considerable en comparación con el suelo natural. Adicionalmente, el porcentaje de expansión se mantiene en el rango de 2.71% a 2.94%, situándose significativamente por debajo del valor inicial (5%) y acercándose aún más al límite estipulado por el MTC (2%). Estos hallazgos evidencian que la incorporación de ceniza volcánica en dicha proporción optimiza significativamente las propiedades mecánicas del suelo. Sin embargo, se aconseja proseguir con las modificaciones para cumplir con los estándares normativos de expansión.

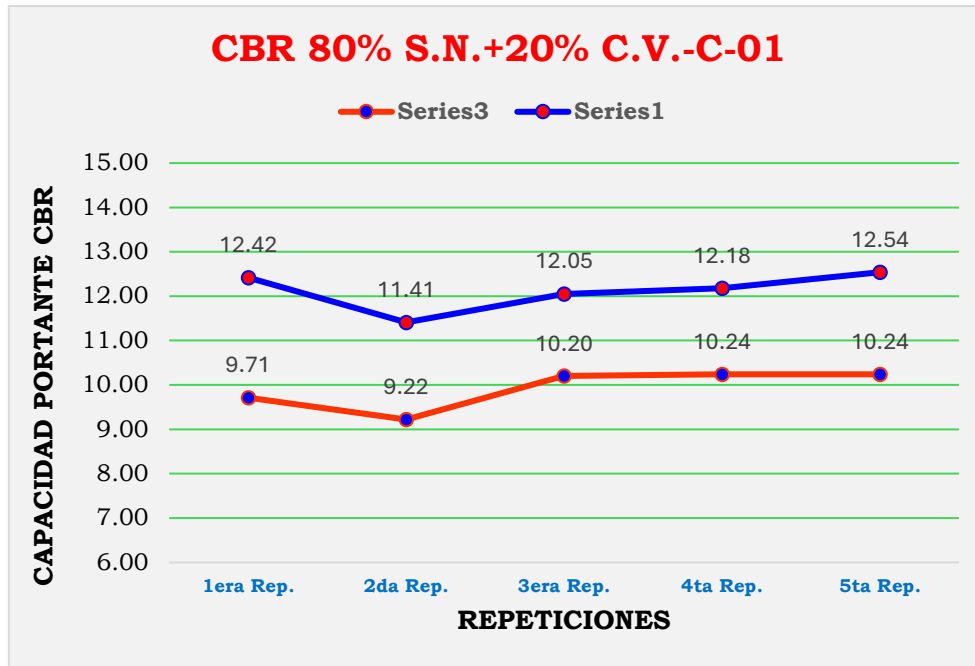


Gráfico 43. Resultados de CBR 80% S.N.+20% C.V. – C-01

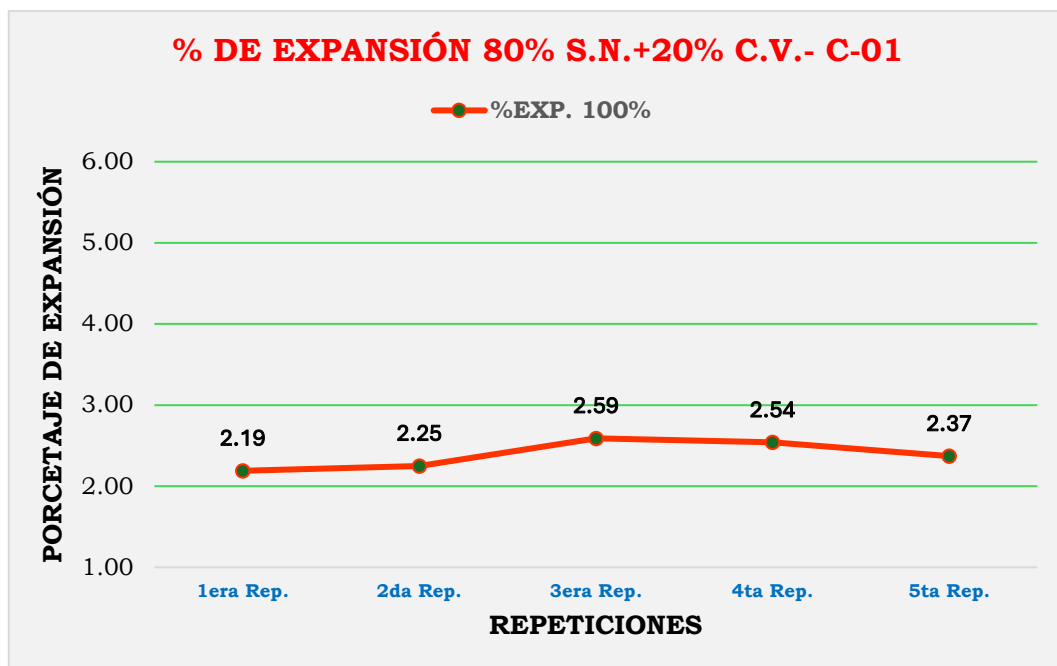


Gráfico 44. Resultados de expansión 80% SN+20% CV – C-01

TABLA L. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 80% SN+ 20% CV. C-01

CALICATA 01	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	9.71	12.42	2.19
2da Rep.	9.22	11.41	2.25
3era Rep.	10.20	12.05	2.59
4ta Rep.	10.24	12.18	2.54
5ta Rep.	10.24	12.54	2.37

La Tabla L muestra los resultados de la prueba CBR realizada con 20% de ceniza volcánica y 95% y 100% de Proctor Modificado para Calicata 01. Se observa un notable aumento de la capacidad portante del suelo. Los valores de CBR al 100% oscilan entre 11,41% y 12,54%, mientras que al 95% oscilan entre 9,22% y 10,24%. Estos valores son significativamente superiores a los encontrados en el suelo en su estado natural. En cuanto a la expansión, se observa una notable disminución del porcentaje de hinchamiento, que se sitúa entre el 2,19% y el 2,59% y se acerca al límite máximo permitido del 2% según la normativa del MTC. De acuerdo con estos resultados, las cualidades mecánicas y físicas del suelo mejoran considerablemente con la adición de un 20% de ceniza volcánica, lo que lo convierte en una opción competitiva para la estabilización de la base en proyectos de construcción de carreteras.

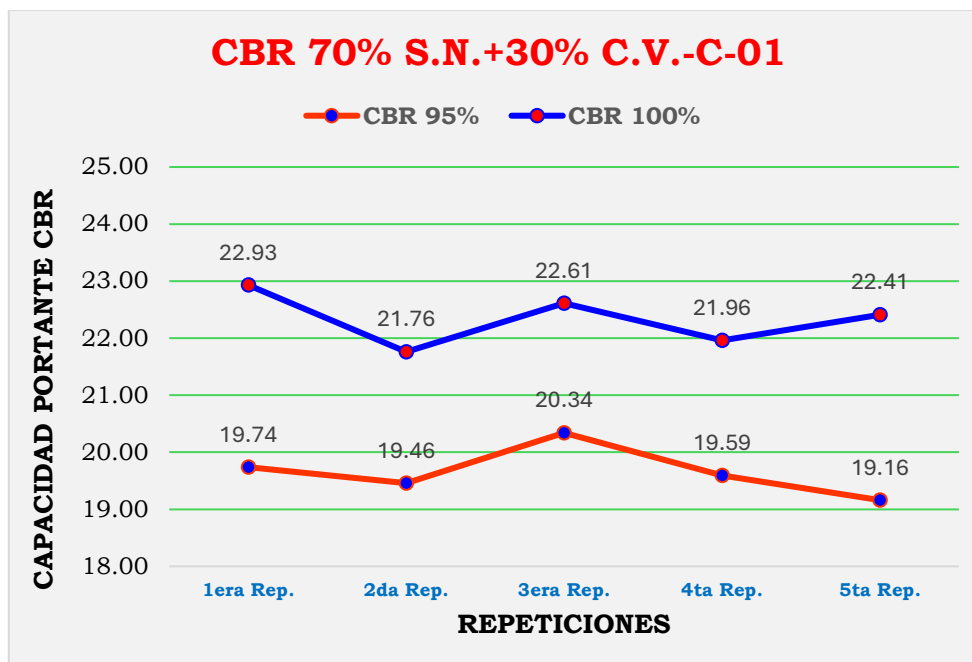


Gráfico 45. Resultados de CBR 70% S.N.+30% C.V. – C-01

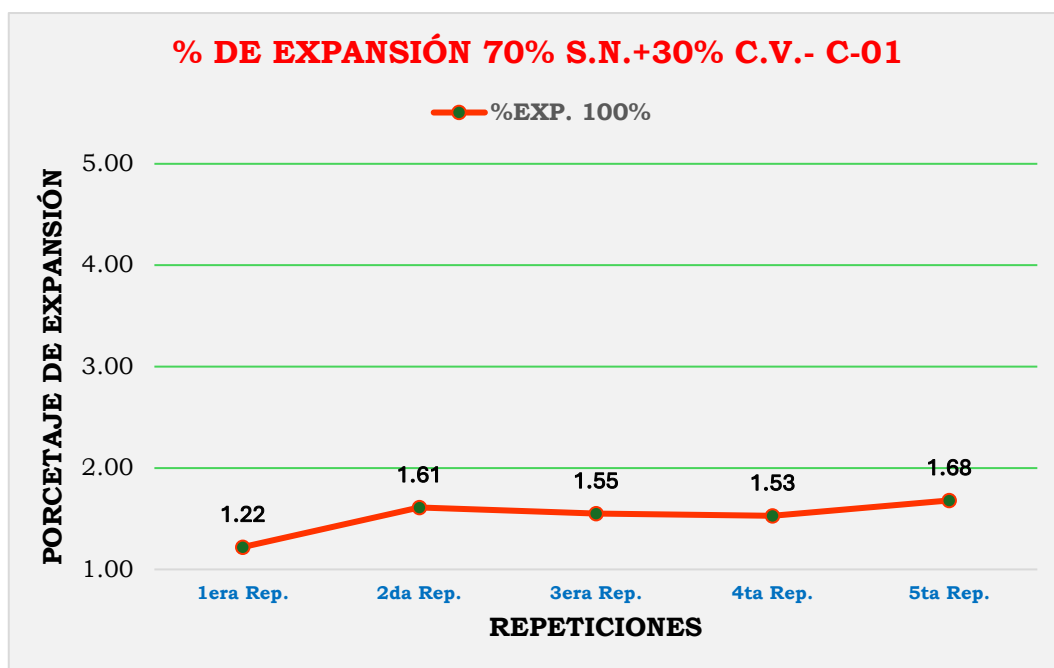


Gráfico 46. Resultados de expansión 70% SN+30% CV – C-01

TABLA LI. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 70% SN+ 30% CV. C-01

CALICATA 01	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	19.74	22.93	1.22
2da Rep.	19.46	21.76	1.61
3era Rep.	20.34	22.61	1.55
4ta Rep.	19.59	21.96	1.53
5ta Rep.	19.16	22.41	1.68

La TABLA LI muestra los hallazgos de las pruebas efectuadas sobre la combinación de suelo natural (S.N.) y ceniza volcánica (C.V.), en relación con su capacidad de carga (CBR) y porcentaje de expansión. Los valores de CBR derivados de diversas condiciones de humedad (95% y 100%) varían entre 19.16% y 20.34% para el CBR a 95% de humedad, y entre 21.76% y 22.93% para el CBR a 100% de humedad. En relación con la proporción de expansión, los resultados oscilan entre 1.22% y 1.68%, lo que sugiere un comportamiento relativamente estable en lo que respecta a la capacidad de carga y expansión. Estos datos indican que la mezcla exhibe un rendimiento moderado, siendo adecuada para su utilización como subrasante, pero con determinados valores de expansión que requieren un seguimiento constante para prevenir problemas estructurales a largo plazo.

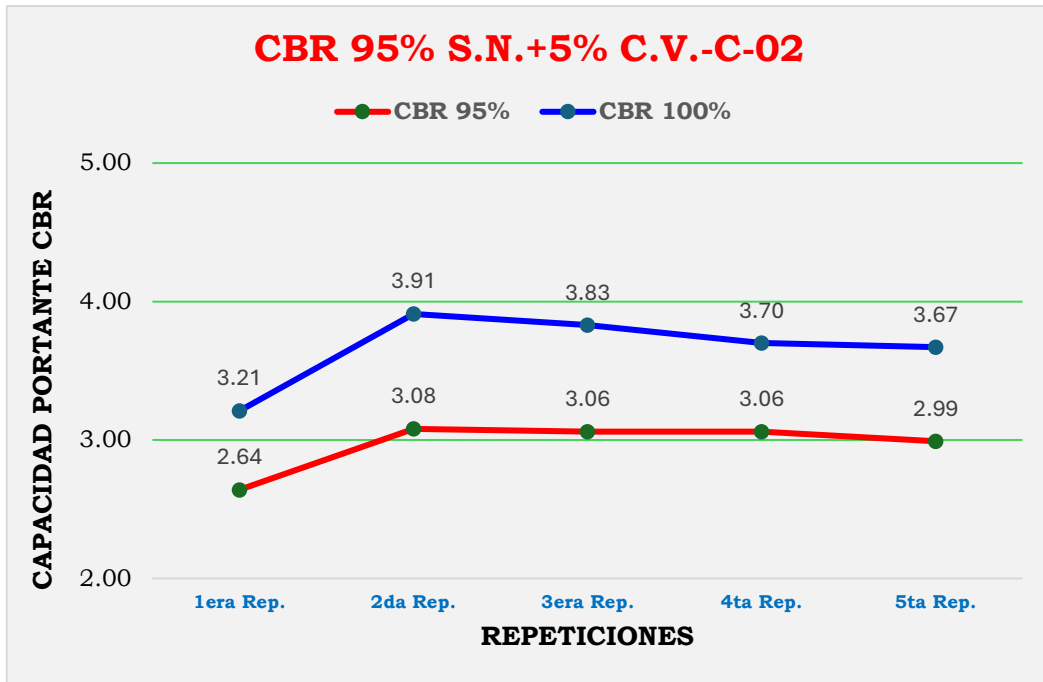


Gráfico 47. Resultados de CBR 95% S.N.+5% C.V. – C-02

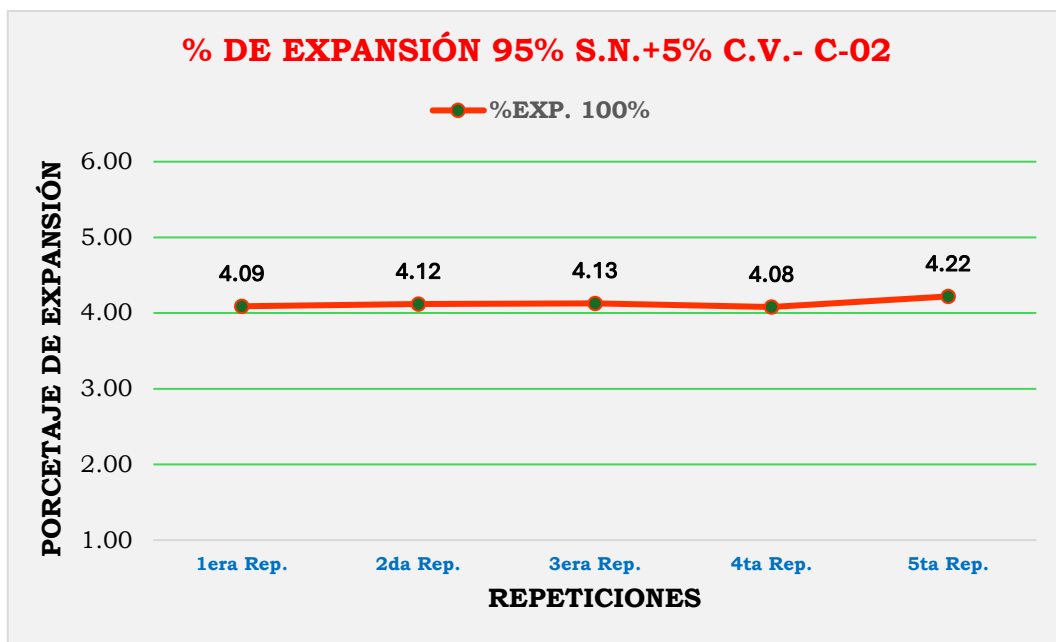


Gráfico 48. Resultados de expansión 95% SN+5% CV – C-02

TABLA LII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 95% SN+ 5% CV. C-02

CALICATA 02	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	2.64	3.21	4.09
2da Rep.	3.08	3.91	4.12
3era Rep.	3.06	3.83	4.13
4ta Rep.	3.06	3.70	4.08
5ta Rep.	2.99	3.67	4.22

La TABLA LII presenta los hallazgos derivados de las pruebas efectuadas sobre la mezcla de 95% de suelo natural (S.N.) y 5% de ceniza volcánica (C.V.), evaluando su capacidad de carga (CBR) y su porcentaje de expansión potencial. Los valores de CBR a una humedad del 95% varían entre 2.64% y 3.08%, mientras que a una humedad del 100%, los valores oscilan entre 3.21% y 3.91%. Respecto al porcentaje de incremento, los resultados oscilan entre un 4.09% y un 4.22%. Estos hallazgos sugieren que, a pesar de que la mezcla exhibe un aumento en su capacidad de carga al incrementar su contenido de ceniza volcánica, continúa exhibiendo una expansión significativa. Esta circunstancia podría plantear ciertos retos en relación con su estabilidad para su aplicación como subrasante, particularmente si se requiere una expansión mínima.

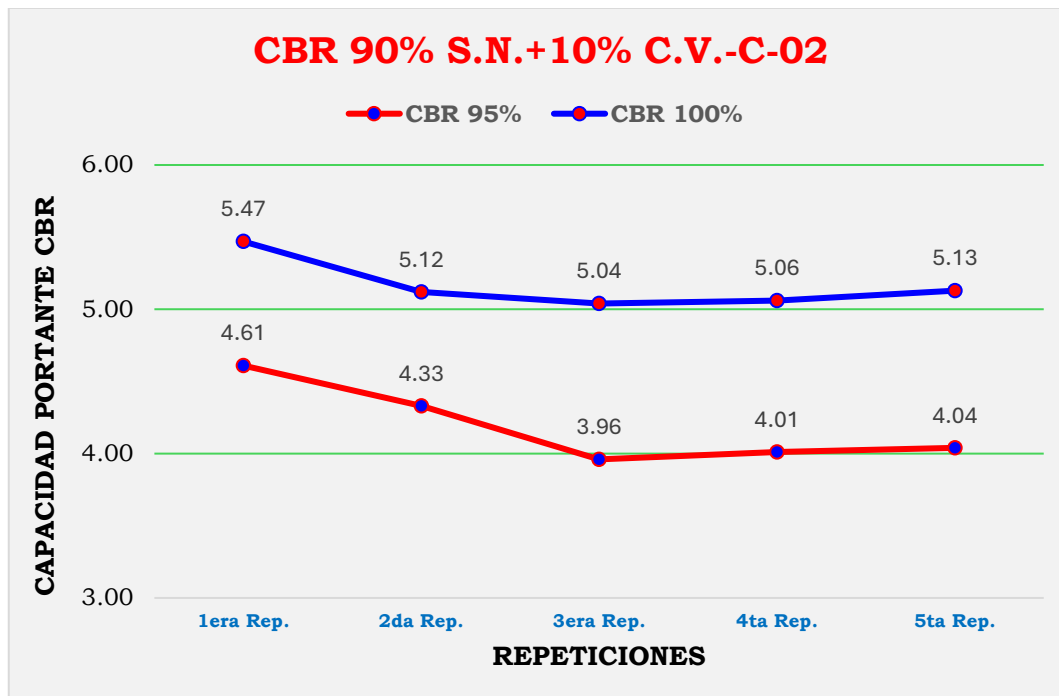


Gráfico 49. Resultados de CBR 90% S.N.+10% C.V. – C-02

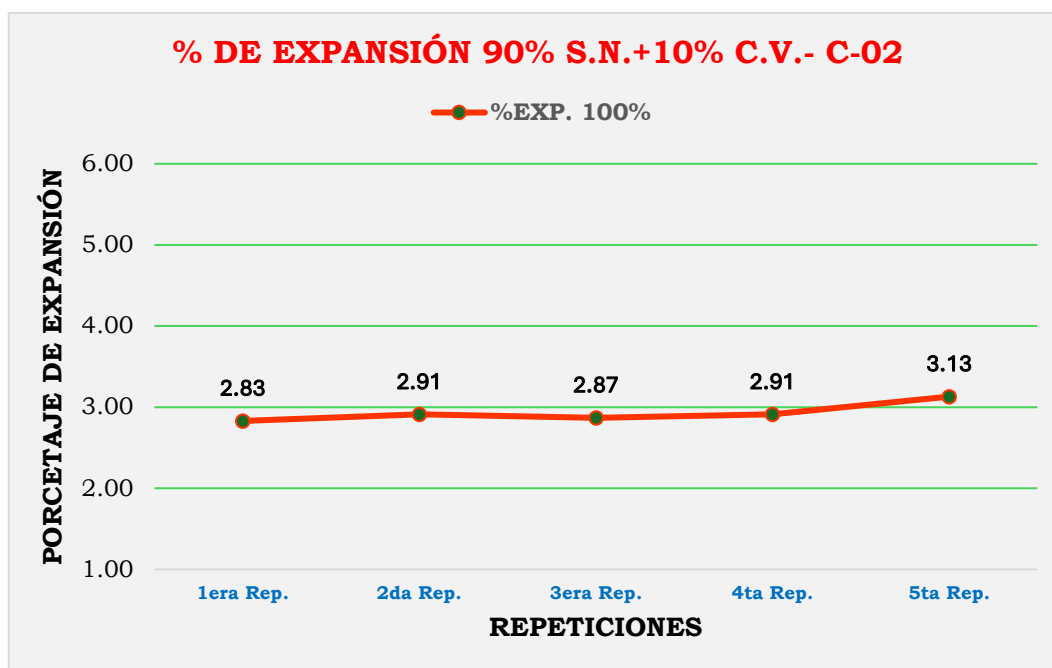


Gráfico 50. Resultados de expansión 90% SN+10% CV – C-02

TABLA LIII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 90% SN+ 10% CV. C-02

CALICATA 02	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	4.61	5.47	2.83
2da Rep.	4.33	5.12	2.91
3era Rep.	3.96	5.04	2.87
4ta Rep.	4.01	5.06	2.91
5ta Rep.	4.04	5.13	3.13

La TABA LIII presenta los hallazgos derivados de las pruebas efectuadas sobre la mezcla de 90% de suelo natural (S.N.) y 10% de ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 02, evaluando tanto su capacidad de carga (CBR) como su porcentaje de expansión. Los valores de CBR a una humedad del 95% fluctúan entre 3.96% y 4.61%, mientras que a una humedad del 100%, los valores fluctúan entre 5.04% y 5.47%. Respecto al porcentaje de expansión, los hallazgos oscilaron entre el 2.83% y el 3.13%. Estos datos sugieren que la mezcla con un contenido elevado de ceniza volcánica exhibe una mejora en su capacidad de carga en comparación con las mezclas con un menor contenido de ceniza, aunque también manifiesta un incremento marginal en su expansión. No obstante, los valores de expansión mantienen su controlabilidad relativa para aplicaciones de subrasante, aunque es necesario supervisar su comportamiento bajo diversas circunstancias.

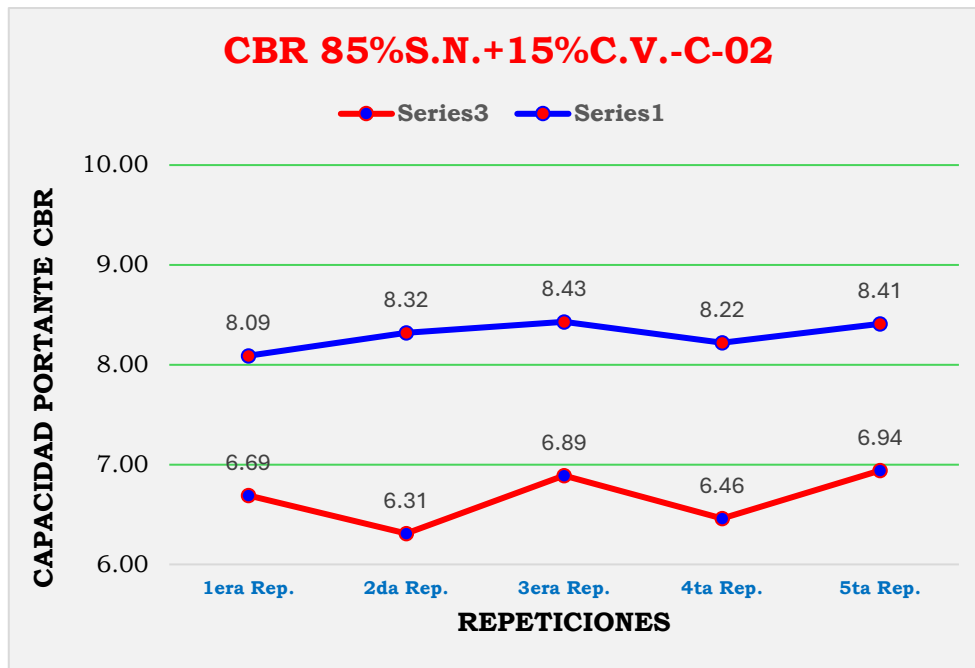


Gráfico 51. Resultados de CBR 85% S.N.+15% C.V. – C-02

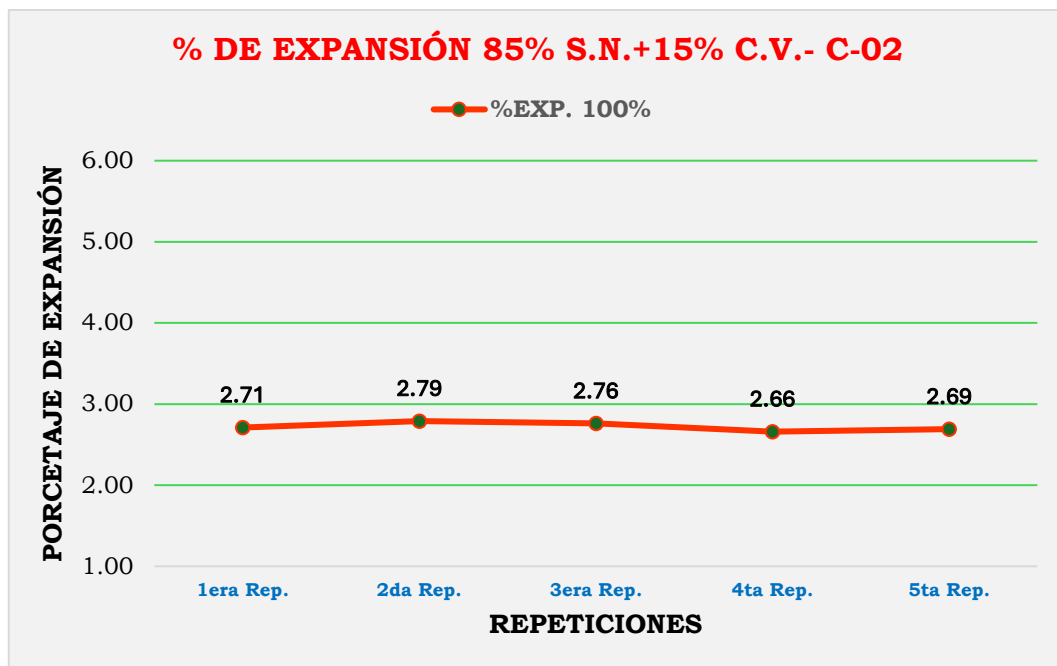


Gráfico 52. Resultados de expansión 85% SN+15% CV – C-02

TABLA LIV. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 85% SN+ 15% CV.

C-02

CALICATA 02	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	6.69	8.09	2.71
2da Rep.	6.31	8.32	2.79
3era Rep.	6.89	8.43	2.76
4ta Rep.	6.46	8.22	2.66
5ta Rep.	6.94	8.41	2.69

La TABLA LIV presenta los hallazgos derivados de los experimentos llevados a cabo sobre la mezcla de 85% de suelo natural (S.N.) y 15% de ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 02, evaluando su capacidad de carga (CBR) y su porcentaje de expansión. Los índices de CBR a una humedad del 95% fluctúan entre el 6.31% y el 6.94%, mientras que a una humedad del 100%, los valores fluctúan entre el 8.09% y el 8.43%. Respecto al porcentaje de expansión, los hallazgos oscilan entre el 2.66% y el 2.79%. Estas estadísticas evidencian una mejora notable en la capacidad de carga con el incremento de la ceniza volcánica, mientras que el porcentaje de expansión se mantiene dentro de un intervalo controlado. La combinación con mayor contenido de ceniza volcánica parece proporcionar una alternativa más estable para su empleo como subrasante, dado que combina una resistencia incrementada con una expansión relativamente baja.

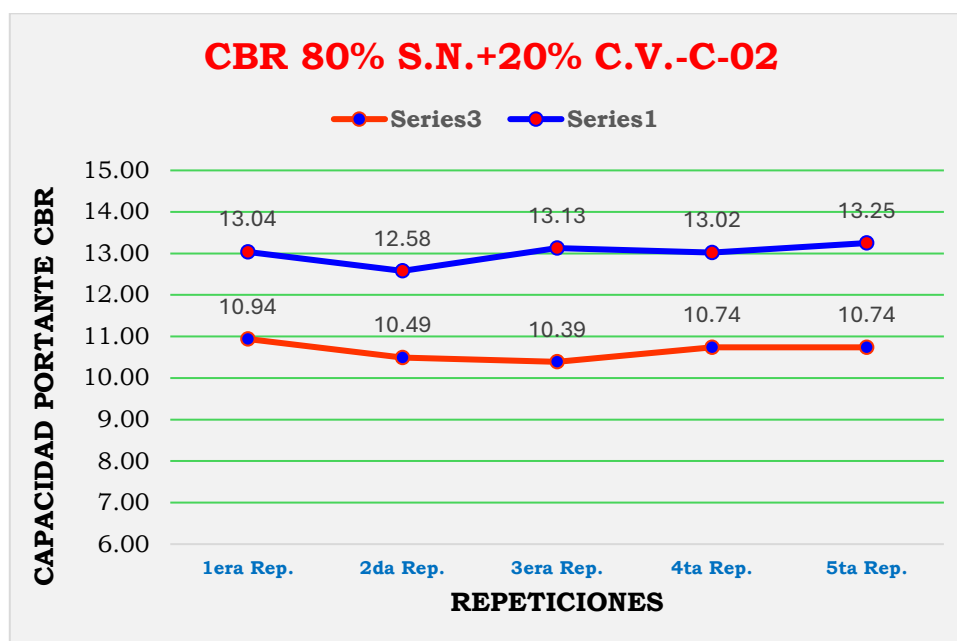


Gráfico 53. Resultados de CBR 80% S.N.+20% C.V. – C-02

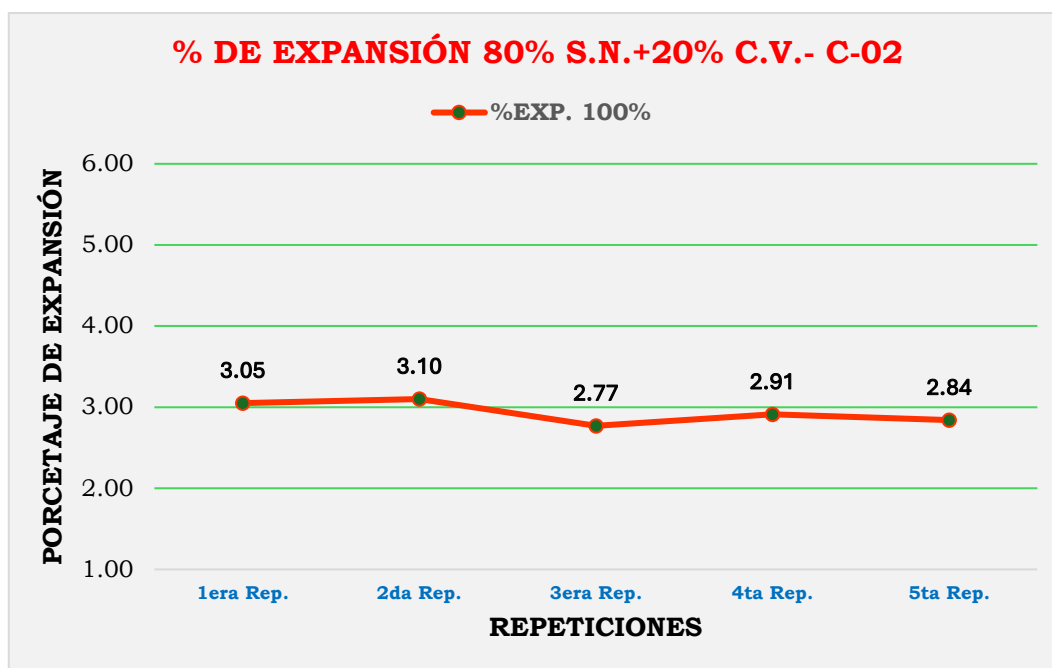


Gráfico 54. Resultados de expansión 80% SN+20% CV – C-02

TABLA LV. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 80% SN+ 20% CV. C-02

CALICATA 02	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	10.94	13.04	3.05
2da Rep.	10.49	12.58	3.10
3era Rep.	10.39	13.13	2.77
4ta Rep.	10.74	13.02	2.91
5ta Rep.	10.74	13.25	2.84

La TABLA LV presenta los hallazgos derivados de las pruebas efectuadas sobre la mezcla de suelo natural (S.N.) y ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 02, evaluando su capacidad de carga (CBR) y su porcentaje de expansión. Los índices de CBR a una humedad del 95% fluctúan entre 10.39% y 10.94%, mientras que a una humedad del 100%, los valores fluctúan entre 12.58% y 13.25% respectivamente. Respecto al porcentaje de incremento, los resultados oscilaron entre el 2.77% y el 3.10%. Estos hallazgos señalan un incremento considerable en la capacidad de carga con el incremento en la proporción de ceniza volcánica, mientras que el porcentaje de expansión continúa siendo relativamente bajo y controlado. Esto indica que la mezcla con un 20% de ceniza volcánica exhibe un comportamiento óptimo tanto en términos de resistencia como de estabilidad, lo que la convierte en una opción apropiada para su aplicación como subrasante en el marco de la investigación.

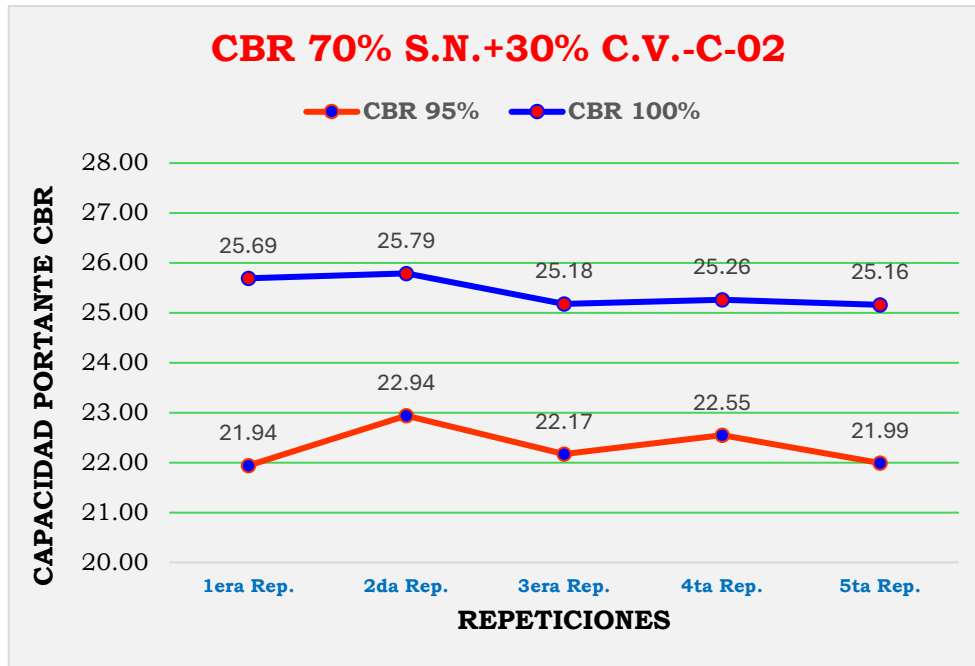


Gráfico 55. Resultados de CBR 70% S.N.+30% C.V. – C-02

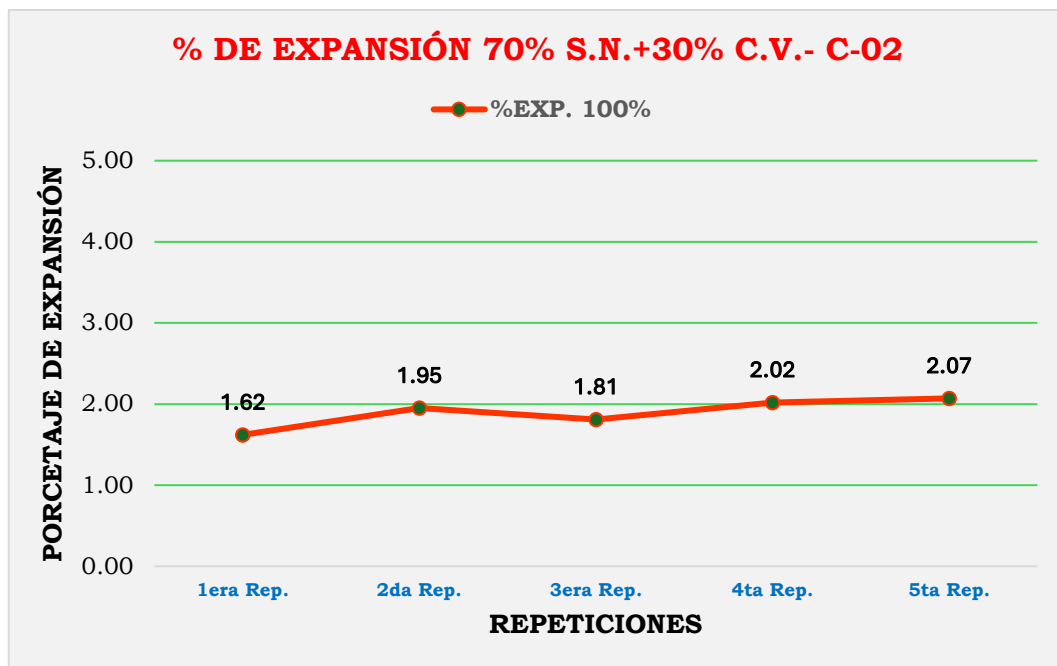


Gráfico 56. Resultados de expansión 70% SN+30% CV – C-02

TABLA LVI. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 70% SN+ 30% CV.

C-02

CALICATA 02	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	21.94	25.69	1.62
2da Rep.	22.94	25.79	1.95
3era Rep.	22.17	25.18	1.81
4ta Rep.	22.55	25.26	2.02
5ta Rep.	21.99	25.16	2.07

En la TABLA LVI se muestran los resultados de las pruebas realizadas con la mezcla compuesta por un 70% de suelo natural y un 30% de ceniza volcánica en el pozo de pruebas 02, donde se evaluaron el porcentaje de expansión y la capacidad portante (CBR). Los valores de CBR oscilan entre 25,16% y 25,79% al 100% de humedad y entre 21,94% y 22,94% al 95% de humedad. El porcentaje de expansión, sin embargo, osciló entre el 1,62% y el 2,07%. El mayor porcentaje de ceniza volcánica en estos resultados indica un notable aumento de la capacidad portante, pero la expansión sigue siendo moderada y menor que en las mezclas con menos ceniza. Esto indica que la combinación de 70% suelo natural con 30% de ceniza volcánica logra un buen equilibrio entre resistencia y control de la expansión, posicionándose como una alternativa técnica sólida para la estabilización de subrasantes.

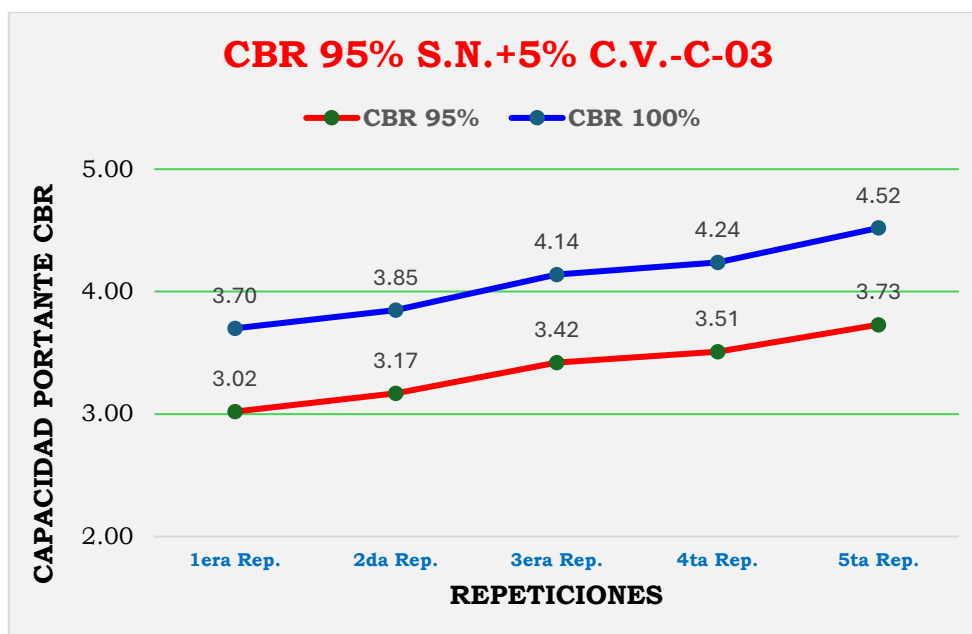


Gráfico 57. Resultados de CBR 95% S.N.+5% C.V. – C-03

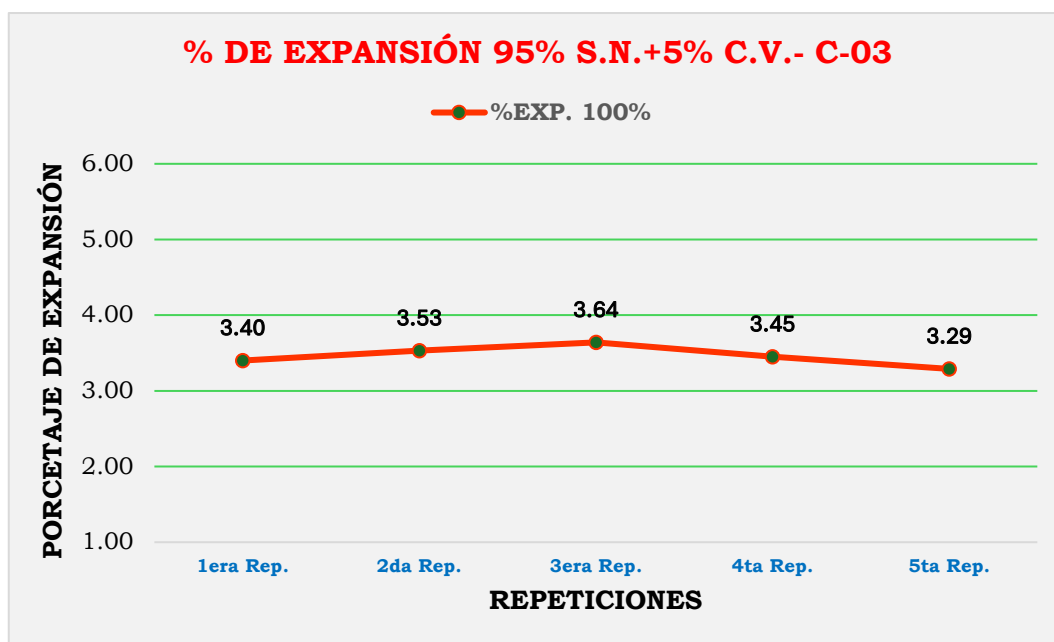


Gráfico 58. Resultados de expansión 95% SN+5% CV – C-03

TABLA LVII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 95% SN+ 5% CV. C-03

CALICATA 03	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	3.02	3.70	3.40
2da Rep.	3.17	3.85	3.53
3era Rep.	3.42	4.14	3.64
4ta Rep.	3.51	4.24	3.45
5ta Rep.	3.73	4.52	3.29

La TABLA LVII presenta los hallazgos derivados de los experimentos llevados a cabo con la mezcla de 95% de suelo natural (S.N.) y 5% de ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 03, evaluando su capacidad de carga (CBR) y su porcentaje de expansión. Los niveles de CBR al 95% de humedad se sitúan en el rango de 3.02% a 3.73%, mientras que al 100% de humedad se sitúan en el rango de 3.70% a 4.52%. Respecto al porcentaje de expansión, los hallazgos oscilan entre el 3.29% y el 3.64%. Aunque se evidencia una reducción marginal en la resistencia del suelo con la incorporación de ceniza volcánica, el porcentaje de expansión continúa en niveles relativamente elevados. Esto indica que, con un 5% de ceniza volcánica, el efecto estabilizador es limitado. Por lo tanto, se requiere un aumento en la proporción del aditivo para optimizar el comportamiento físico-mecánico del suelo como subrasante.

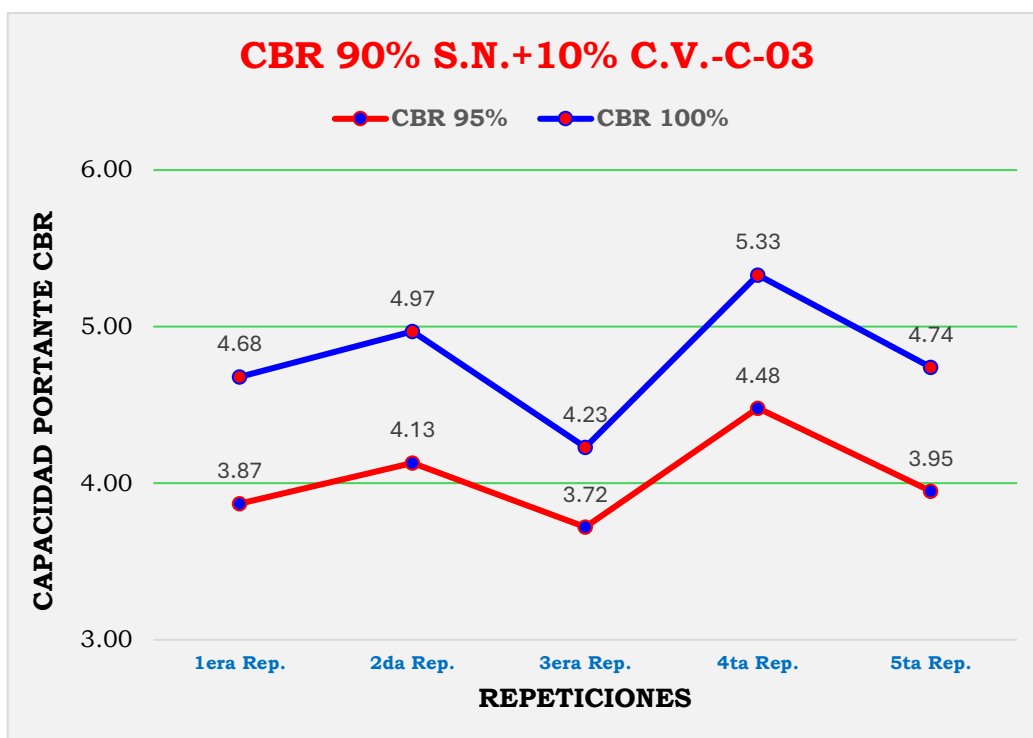


Gráfico 59. Resultados de CBR 90% S.N.+10% C.V. – C-03

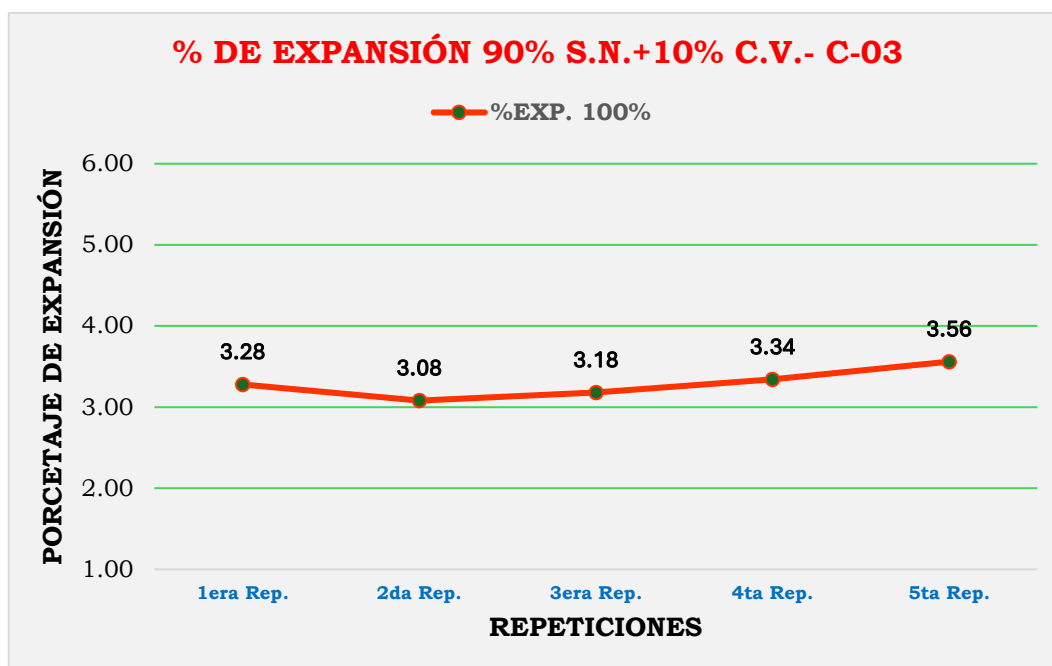
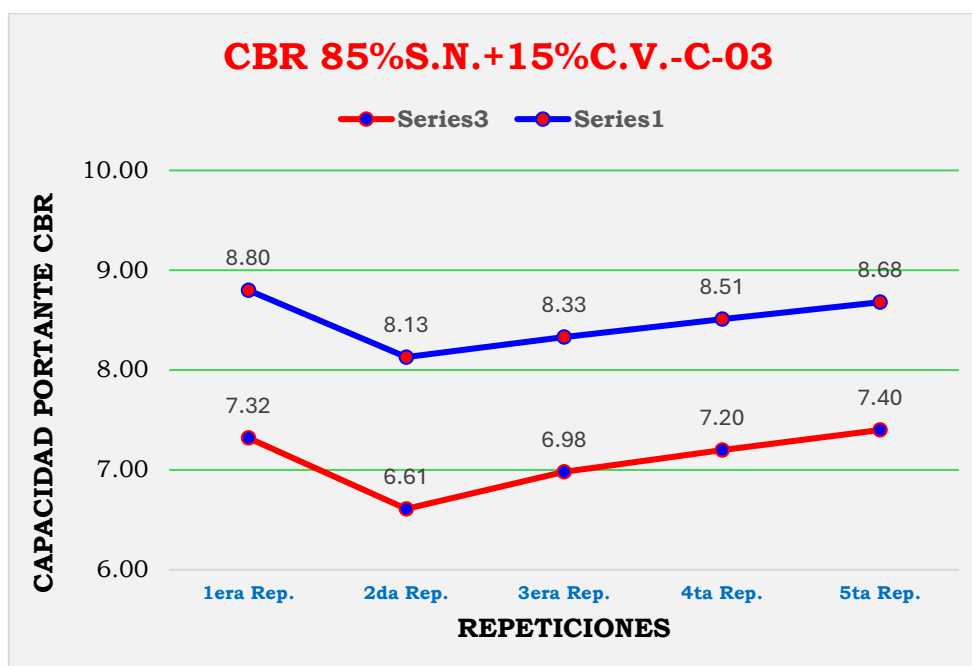


Gráfico 60. Resultados de expansión 90% SN+10% CV – C-03

TABLA LVIII. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 90% SN+ 10% CV.**C-03**

CALICATA 03	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	3.87	4.68	3.28
2da Rep.	4.13	4.97	3.08
3era Rep.	3.72	4.23	3.18
4ta Rep.	4.48	5.33	3.34
5ta Rep.	3.95	4.74	3.56

La TABLA VIII presenta los hallazgos derivados de las pruebas efectuadas sobre la mezcla de 90% de suelo natural (S.N.) y 10% de ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 03, evaluando tanto la capacidad de carga (CBR) como el porcentaje de expansión. Los niveles de CBR al 95% de humedad se sitúan en el rango de 3.72% a 4.48%, mientras que al 100% de humedad se sitúan en el rango de 4.23% a 5.33%. Respecto al porcentaje de expansión, los hallazgos oscilan entre un 3.08% y un 3.56%. Estos hallazgos evidencian una reducción marginal en la resistencia del terreno en comparación con la mezcla con un 5% de ceniza volcánica, junto con una reducción marginal en el porcentaje de expansión. Sin embargo, los índices de expansión continúan sobrepasando el 3%, lo que indica que el grado de estabilización logrado continúa siendo restringido. Esto sugiere la necesidad de incrementar el contenido de ceniza volcánica para lograr un comportamiento más propicio en su aplicación como subrasante.

**Gráfico 61. Resultados de CBR 85% S.N.+15% C.V. – C-03**

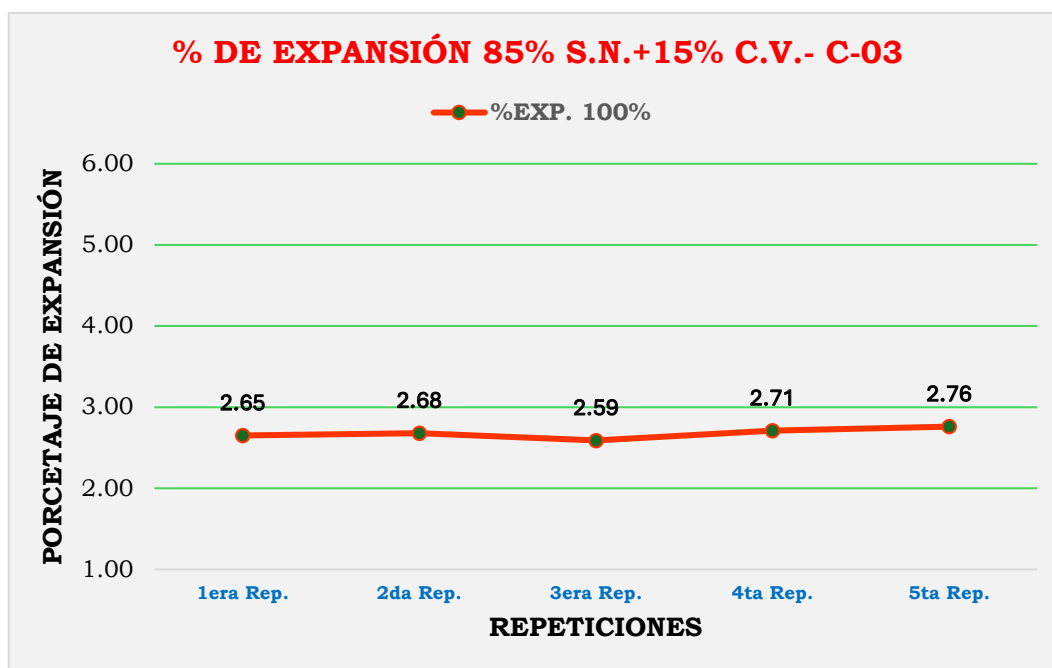


Gráfico 62. Resultados de expansión 85% SN+15% CV – C-03

TABLA LIX. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 85% SN+ 15% CV. C-03

CALICATA 03	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	7.32	8.80	2.65
2da Rep.	6.61	8.13	2.68
3era Rep.	6.98	8.33	2.59
4ta Rep.	7.20	8.51	2.71
5ta Rep.	7.40	8.68	2.76

La TABLA LIX presenta los hallazgos derivados de las pruebas efectuadas sobre la mezcla de 90% de suelo natural (S.N.) y 10% de ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 03, evaluando tanto la capacidad de carga (CBR) como el porcentaje de expansión. Los niveles de CBR al 95% de humedad se sitúan en el rango de 3.72% a 4.48%, mientras que al 100% de humedad se sitúan en el rango de 4.23% a 5.33%. Respecto al porcentaje de expansión, los hallazgos oscilan entre un 3.08% y un 3.56%. Estos hallazgos evidencian una reducción marginal en la resistencia del terreno en comparación con la mezcla con un 5% de ceniza volcánica, junto con una reducción marginal en el porcentaje de expansión. Sin embargo, los índices de expansión continúan sobrepasando el 3%, lo que indica que el grado de estabilización logrado continúa siendo restringido. Esto sugiere la necesidad de incrementar el contenido de ceniza volcánica para lograr un comportamiento más propicio en su aplicación como subrasante.

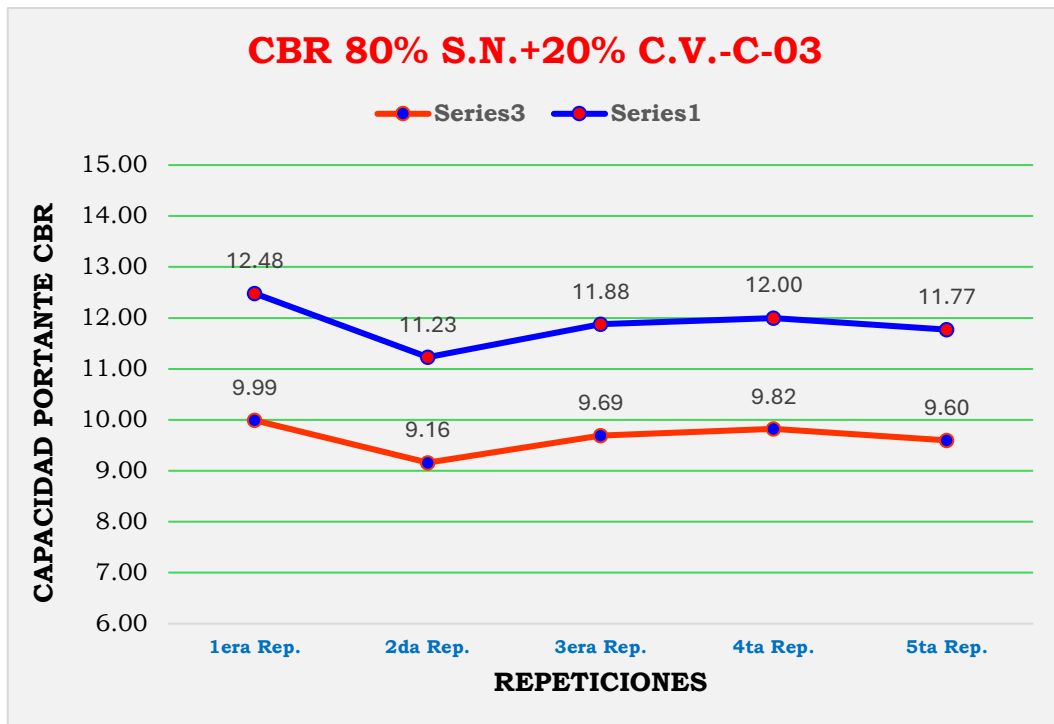


Gráfico 63. Resultados de CBR 80% S.N.+20% C.V. – C-03

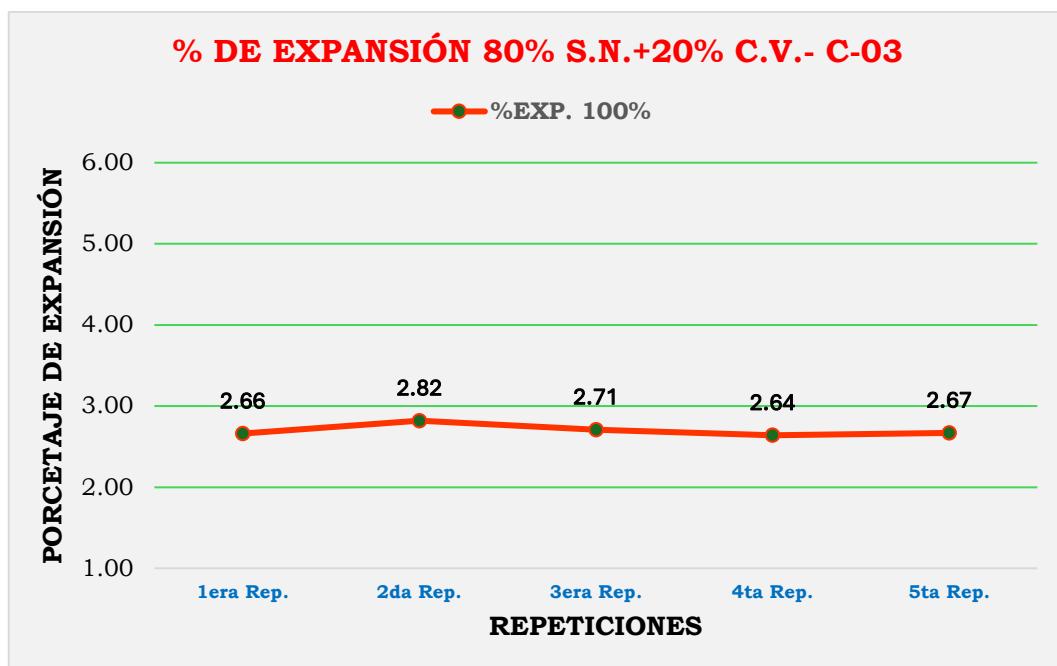


Gráfico 64. Resultados de expansión 80% SN+20% CV – C-03

TABLA LX. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 80% SN+ 20% CV. C-03

CALICATA 03	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	9.99	12.48	2.66
2da Rep.	9.16	11.23	2.82
3era Rep.	9.69	11.88	2.71
4ta Rep.	9.82	12.00	2.64
5ta Rep.	9.60	11.77	2.67

La TABLA LX presenta los hallazgos derivados de los experimentos llevados a cabo sobre la mezcla de 80% de suelo natural (S.N.) y 20% de ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 03, evaluando la capacidad de carga (CBR) y el porcentaje de expansión. Los índices de CBR al 95% de humedad varían entre 9.16% y 9.99%, mientras que al 100% de humedad se encuentran en una fluctuación entre 11.23% y 12.48%. Respecto al porcentaje de incremento, los valores se mantienen en un rango de 2.64% a 2.82%. Estos hallazgos demuestran una mejora continua en la resistencia del suelo en comparación con mezclas con una proporción inferior de ceniza, además de mantener los niveles de expansión por debajo del límite crítico del 3%. Lo expuesto evidencia que la incorporación del 20% de ceniza volcánica contribuye de manera positiva a la estabilización de arcillas expansivas, optimizando su rendimiento para su utilización como subrasante.

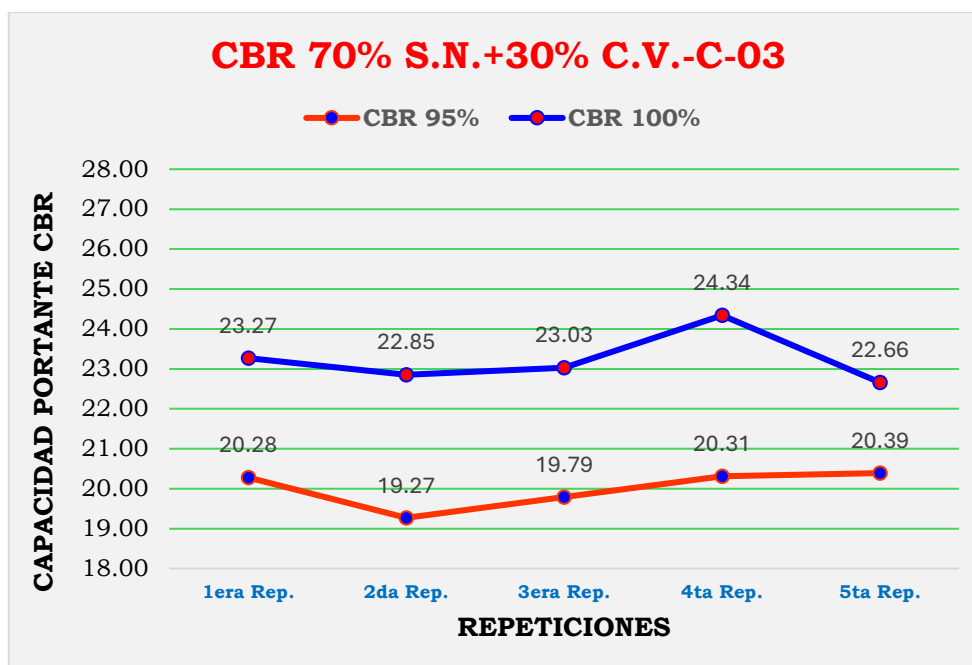


Gráfico 65. Resultados de CBR 70% S.N.+30% C.V. – C-03

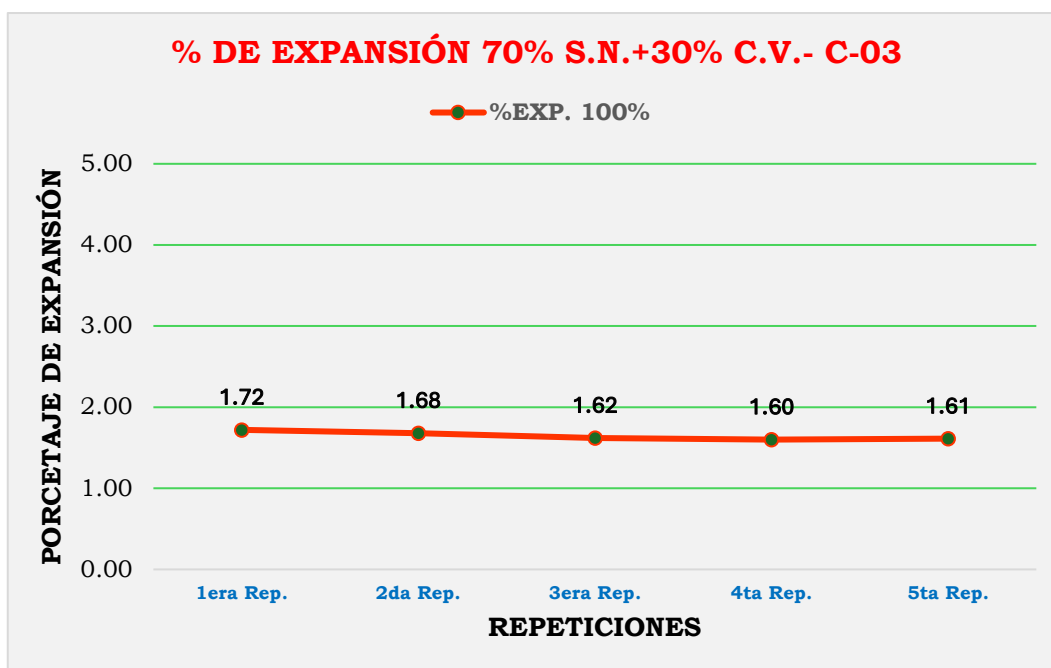


Gráfico 66. Resultados de expansión 70% SN+30% CV – C-03

**TABLA LXI. RESULTADOS DEL CBR Y EXPANSIÓN 70% SN+ 30% CV.
C-03**

CALICATA 03	CBR 95%	CBR 100%	% EXPANSIÓN
1era Rep.	20.28	23.27	1.72
2da Rep.	19.27	22.85	1.68
3era Rep.	19.79	23.03	1.62
4ta Rep.	20.31	24.34	1.60
5ta Rep.	20.39	22.66	1.61

La TABLA LXI muestra los resultados obtenidos en los ensayos correspondientes a la mezcla compuesta por 70% de suelo natural (S.N.) y 30% de ceniza volcánica (C.V.) en la calicata 03, evaluando la resistencia CBR y el porcentaje de expansión. Los valores del CBR al 95% de humedad varían entre 19.27% y 20.39%, mientras que al 100% de humedad se sitúan entre 22.66% y 24.34%. En cuanto al porcentaje de expansión, los resultados se encuentran en un rango estrecho de 1.60% a 1.72%, valores significativamente por debajo del límite permitido del 3%. Estos datos reflejan una notable mejora en la resistencia del suelo frente a las versiones con menor proporción de ceniza, así como un comportamiento estable frente a la expansión, lo cual confirma la efectividad del 30% de ceniza volcánica en la estabilización de arcillas expansivas para su uso como subrasante en el distrito La Victoria – Chiclayo

Grado de compactación-Ensayo de densidad de campo

TABLA LXII. RESULTADOS DE DENSIDAD DE CAMPO-GRADO DE COMPACTACIÓN

DENSIDAD DE CAMPO	MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm ³)	ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	GRADO DE COMPACTACIÓN
Muestra Patrón	1.94	10.60	96.00
Muestra Patrón	1.94	10.60	95.60
MP+30% Ceniza Volcánica	1.98	11.40	99.80
MP+30% Ceniza Volcánica	1.98	11.40	99.00

Los datos del nivel de compactación del suelo estabilizado con 30% de ceniza volcánica se muestran en la TABLA LXII. Se observaron valores de compactación de 99,8% y 99,0% en relación con la densidad seca máxima de 1,98 g/cm³, establecida en laboratorio mediante el ensayo Proctor Modificado. Estas cifras muestran que el suelo ha respondido muy bien a la inyección de ceniza volcánica, ya que superan considerablemente el mínimo necesario del 95%. Por el contrario, la muestra sin estabilizador presentó índices de compactación del 96,0% y 95,6%, una densidad seca máxima de 1,94 g/cm³ y un contenido de humedad ideal del 10,6%, frente al 11,4% de la combinación con ceniza. Estos resultados confirman que la incorporación de ceniza volcánica no solo aumenta la densidad del suelo compactado, sino que también mejora su comportamiento en campo, fortaleciendo su desempeño como subrasante en obras viales.

Penetrómetro Dinámico de Cono

TABLA LXIII. RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA NATURAL

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO ASTM D 6951

PUNTO:	PROMEDIO	CH	Arcilla de alta plasticidad			
LOCALIZACIÓN						
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg		FECHA:	19/04/2025		
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0					
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CH					
ADICIÓN	Terreno Natural					

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice PDC (mm/golpe)	CBR ⁽¹⁾ (%)
0	0.0	0.0	0			
4.3	4.3	43.6	100	100	23.5	8.5 %
7.0	2.8	71.8	200	100	36.4	5.2 %
9.75	2.8	100.0	300	100	36.4	5.2 %

En la TABLA LXIII. El índice PDC en la primera medición fue de 23,5 mm por carrera, lo que significa que el valor CBR predicho fue de 8,5%. Esta cifra, sin embargo, disminuyó con el aumento de la profundidad, nivelándose a 200 y 300 mm, cuando el índice PDC alcanzó 36,4 mm por golpe, y aumentando después a 5,2% a profundidades mayores. Estos resultados muestran una disminución de la resistencia del suelo a mayor profundidad, lo que sugiere que el suelo carece de potencial para funcionar como subrasante en su estado natural sin algún tipo de tratamiento. Por ello, es necesario implementar métodos de estabilización que mejoren las propiedades mecánicas del suelo y garanticen su adecuada respuesta en la construcción de vías.

**TABLA LXIV. RESULTADOS DE ENSAYO DPC MUESTRA
EXPERIMENTAL
PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
ASTM D 6951**

PUNTO:	1	CH	Arcilla de alta plasticidad			
LOCALIZACIÓN						
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg				FECHA:	19/04/2025
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0					
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CH					
ADICIÓN	30 % Ceniza Volcanica					

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR ⁽¹⁾ (%)
0	0	0.0	0			
10	10	34.5	100	100	10.0	22.15
20	10	69.0	200	100	10.0	22.15
29	9	100.0	300	100	11.1	19.68

La TABLA LXIV. Muestra los resultados de una adición de 30% de CV, Cuando se compara con el suelo natural, este suelo, categorizado como arcilla de alta plasticidad (CH), mostró un notable incremento en la capacidad portante. Mientras que el CBR estimado aumentó drásticamente, alcanzando valores de 21,5% a 100 mm, 20,3% a 200 mm y 17,9% a 300 mm de profundidad, el índice PDC disminuyó, oscilando entre 10,3 y 12,1 mm por golpe. Estos resultados demuestran que la ceniza volcánica funciona como un estabilizador eficaz al mostrar una disminución de la deformabilidad del suelo y un aumento de su resistencia. La tierra tratada satisface, por tanto, las condiciones necesarias para ser utilizada como subrasante en proyectos de infraestructuras viarias.

Análisis económico

El análisis económico de la implementación de cenizas volcánicas en la estabilización de arcillas expansivas se enfoca en establecer la factibilidad y el beneficio económico de esta opción en comparación con los métodos convencionales de mejora de suelos. Este análisis es esencial, dado que en numerosas intervenciones viales en el distrito de La Victoria – Chiclayo, no se contemplan directrices técnicas exhaustivas durante la fase inicial de habilitación de vías. En el marco de esta evaluación, se llevará a cabo un análisis de costos empleando el método de análisis de precios unitarios, teniendo en cuenta las partidas pertinentes conforme al Manual de Carreteras. Especificaciones Generales Técnicas para la Construcción del MTC. La comparativa incorporará una proyección de subrasantes estabilizadas mediante métodos tradicionales y subrasantes tratadas con cenizas volcánicas, con el propósito de determinar cuál opción proporciona condiciones superiores tanto en términos de rendimiento técnico como en eficiencia económica para su implementación en vías no pavimentadas del distrito.

Evaluación económica con cemento

La evaluación de los costos por metro cuadrado para la mejora del suelo con cemento considera un costo directo de S/ 84.95 por metro cuadrado, que se distribuye en tres componentes esenciales: mano de obra, materiales y equipo.

En cuanto a la fuerza laboral, esta se compone de empleados, oficiales y operarios, cuyo costo total asciende a S/ 1.67 por metro cuadrado. Esta cuadrilla consta de tres empleados (S/ 1.32), un oficial (S/ 0.29) y 0.2 operarios (S/ 0.06), de acuerdo con sus respectivas jornadas laborales y tarifas unitarias correspondientes.

El cemento es el principal material utilizado, con un consumo de 2.4 bolsas por metro cuadrado, lo que equivale a un costo de S/ 68.40.

Respecto a los equipos, se incluyen tanto herramientas manuales como maquinaria de gran peso. Este conjunto comprende un rodillo vibratorio liso autopropulsado (S/ 3.60), una motoniveladora equipada con ripper (S/ 7.20), un camión cisterna para agua (S/ 4.00), y herramientas manuales (S/ 0.08). Esto resulta en un costo total por equipos de S/ 14.88 por metro cuadrado. Este análisis ofrece una perspectiva exhaustiva y detallada de los recursos utilizados y los costos vinculados a la implementación del mejoramiento del suelo mediante el uso de cemento, facilitando la toma de decisiones fundamentadas en términos de su viabilidad económica y técnica.

TABLA LXV. ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CEMENTO

MEJORAMIENTO DE SUELO CON CEMENTO						
Und/DIA	500.0000	EQ. 500.0000	Costo unitario directo por : m2			84.95
	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$	Parcial \$
Mano de Obra						1.67
	PEON	hh	3.0000	0.0480	27.49	1.32
	OFICIAL	hh	1.0000	0.0160	18.12	0.29
	OPERARIO	hh	0.2000	0.0032	18.12	0.06
Materiales						68.40
	CEMENTO	bls		2.4000	28.50	68.40
Equipos						14.88
	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.67	0.08
	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101 - 135 HP 10 -12 TN	hm	1.0000	0.0160	225.00	3.60
	MOTONIVELADORA 125 HP C/ RIPPER	hm	1.0000	0.0160	450.00	7.20
	CAMION CISTERNA AGUA 4X2 145-165 HP 2000 GAL	hm	1.0000	0.0160	250.00	4.00

Evaluación económica con cal

El análisis de los costos unitarios para la mejora del suelo con cal indica un costo directo de S/ 62.20 por metro cuadrado, que se distribuye en tres componentes fundamentales: mano de obra, materiales y equipo.

Respecto a la fuerza laboral, se contempla la participación de empleados, oficiales y operarios, con un costo total de S/ 1.67 por metro cuadrado total. Esta cuadrilla comprende tres empleados (S/ 1.32), un oficial (S/ 0.29) y 0.2 operarios (S/ 0.06), conforme a las jornadas y precios unitarios previamente establecidos.

La cal de obra (20 kg) es el principal insumo empleado, con una demanda de 2.55 bolsas por metro cuadrado, lo que representa un costo de S/ 45.65 en materiales.

En lo que respecta a los equipos, se contempla la utilización tanto de herramientas manuales (S/ 0.08) como de maquinaria pesada. Entre los equipos se encuentran un rodillo liso vibratorio autopropulsado (S/ 3.60), una motoniveladora con ripper (S/ 7.20) y un camión cisterna de agua (S/ 4.00), lo que resulta en un costo total de S/ 14.88 por metro cuadrados.

Este estudio ofrece una evaluación minuciosa de los recursos necesarios y sus costos asociados, lo que permite una perspectiva clara y fundamentada de la factibilidad técnica y económica del mejoramiento del suelo mediante el uso de cal.

TABLA LXVI. ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CAL

MEJORAMIENTO DE SUELO CON CAL						
Und/DIA	500.0000	EQ. 500.0000	Costo unitario directo por : m2			62.20
	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$	Parcial \$
Mano de Obra						1.67
PEON		hh	3.0000	0.0480	27.49	1.32
OFICIAL		hh	1.0000	0.0160	18.12	0.29
OPERARIO		hh	0.2000	0.0032	18.12	0.06
Materiales						45.65
CAL DE OBRA (20kg)		bls		2.5500	17.90	45.65
Equipos						14.88
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	1.67	0.08
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101 - 135 HP 10 -12 TN		hm	1.0000	0.0160	225.00	3.60
MOTONIVELADORA 125 HP C/ RIPPER		hm	1.0000	0.0160	450.00	7.20
CAMION CISTERNA AGUA 4X2 145-165 HP 2000 GAL		hm	1.0000	0.0160	250.00	4.00

Evaluación económica con ceniza volcánica

La evaluación de los costos unitarios para la mejora del suelo mediante la incorporación de ceniza volcánica señala un costo directo unitario de S/ 93.15 por metro cuadrado, distribuido en tres componentes principales: mano de obra, materiales y equipos.

Sobre la base de las horas de trabajo y las tarifas vigentes, la mano de obra involucrada - que consta de peones, oficiales y operarios- representa un costo total de S/ 1,67 por metro cuadrado. Esto equivale a S/ 1,32 por tres trabajadores, S/ 0,29 por un oficial y S/ 0,06 por 0,2 trabajadores más.

En términos de materiales, la ceniza volcánica es el componente más importante desde una perspectiva económica en el análisis. Consume 2,04 sacos por metro cuadrado, lo que se traduce en un gasto de S/74,60.

Se gasta un total de S/ 16,88 por metro cuadrado en equipamiento, que incluye maquinaria pesada como un horno (S/ 2,00), un rodillo vibratorio autopropulsado (S/ 3,60), una motoniveladora con ripper (S/ 7,20) y un camión cisterna (S/ 4,00), además de ambas herramientas manuales (S/ 0,08).

En conjunto, este análisis detalla de manera clara y técnica los recursos y costos necesarios para mejorar el suelo usando ceniza volcánica, destacando que esta opción es económicamente viable y competitiva frente a métodos tradicionales como el uso de cal o cemento.

TABLA LXVII. ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON CENIZA VOLCÁNICA

MEJORAMIENTO DE SUELO CON ADICION DE CENIZA VOLCÁNICA						
Und/DIA	500.0000	EQ. 500.0000	Costo unitario directo por : m2			91.15
	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$	Parcial \$
Mano de Obra						1.67
PEON		hh	3.0000	0.0480	27.49	1.32
OFICIAL		hh	1.0000	0.0160	18.12	0.29
OPERARIO		hh	0.2000	0.0032	18.12	0.06
Materiales						74.60
CENIZA VOLCANICA		bls		2.0400	36.57	74.60
Equipos						14.88
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	1.67	0.08
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101 - 135 HP 10 -12 TN		hm	1.0000	0.0160	225.00	3.60
MOTONIVELADORA 125 HP C/ RIPPER		hm	1.0000	0.0160	450.00	7.20
CAMION CISTERNA AGUA 4X2 145-165 HP 2000 GAL		hm	1.0000	0.0160	250.00	4

Discusión

Los resultados de este estudio se compararán con investigaciones previas que también emplearon ceniza volcánica para estabilizar suelos arcillosos en subrasantes viales. Desde el principio, se confirma el objetivo principal del trabajo, ya que la adición de ceniza volcánica a las arcillas expansivas del distrito de La Victoria – Chiclayo mostró mejoras claras en las propiedades físicas y mecánicas del suelo. En particular, se alcanzó un CBR promedio superior al 25%, mientras que la expansión del suelo se redujo a cerca del 2%, condiciones que favorecen su uso como subrasante.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Vargas [13], quien también aplicó ceniza volcánica y logró aumentar el CBR hasta un 61.02%, además de reducir el índice de expansión de 1.074% a 0.304%. Aunque en este estudio los valores de expansión no bajaron tanto como en el trabajo de Vargas, la tendencia es muy parecida: la ceniza volcánica ayuda a mejorar la resistencia y a controlar la expansión del suelo. En resumen, estos resultados refuerzan la idea de que la ceniza volcánica es una alternativa técnica efectiva y ambientalmente sostenible para optimizar suelos arcillosos en proyectos viales.

En segundo lugar, el análisis químico realizado mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) reveló una alta concentración de óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio en la ceniza volcánica, que son componentes esenciales en la optimización de los suelos arcillosos. Esto indica que se apoya el objetivo específico 1. Esta evaluación confirmó su potencial como agente estabilizador de acuerdo con las normas ASTM C25 y USAQ-ME06. Los resultados de Villacís [9], que utilizaron Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para investigar la microestructura de las arcillas tratadas con ceniza, son consistentes con esto. arcillas tratadas con cascarilla de arroz y cenizas volcánicas, observando resultados como una disminución del 54% en el índice de expansión y un aumento del 54,98% en la cohesividad hasta 1,34 kg/cm². Aunque no se utilizó la metodología SEM en esta investigación, se utilizó la técnica XRF para identificar los compuestos responsables de estas mejoras, confirmando que la ceniza volcánica tiene las propiedades necesarias para estabilizar suelos expansivos a nivel de subrasante.

En tercer lugar, se trató el objetivo específico 2, que se centró en examinar las características físicas de las arcillas expansivas en su estado natural y con la incorporación de ceniza volcánica en proporciones que oscilan entre el 5% y el 30%. Los contenidos de humedad natural oscilaron entre el 20,26% y el 24,73%, y se registró una elevada proporción de finos, que excedió el 91% en todas las calicatas, lo que corrobora la consistencia coherente del suelo. Además, se documentaron valores fluctuantes de densidad real, con el valor más elevado de 2,892 g/cm³ y el más bajo de 2,543 g/cm³, lo que sugiere posibles variaciones mineralógicas entre regiones. En su estado natural, el Índice de Plasticidad (IP) alcanzó un valor de 30,49, lo que clasifica al suelo como altamente plástico. Estos hallazgos pueden ser contrastados con los registrados por Vilcas [15], quien estabilizó suelos arcillosos mediante la utilización de ceniza de ladrillo y documentó mejoras notables, tales como el incremento de la densidad seca máxima en 8,06% y la reducción de la humedad óptima en 15,59%, además de incrementos significativos en la capacidad de soporte (CBR). Pese a la utilización de diversas categorías de ceniza, ambos estudios evidencian que los materiales con características cementantes tienen la capacidad de optimizar las condiciones físicas y mecánicas del suelo. En este contexto, el presente estudio proporciona pruebas empíricas sobre la factibilidad de la ceniza volcánica como opción sostenible para la mejora de suelos expansivos, particularmente en regiones con acceso a este residuo natural.

En relación con el objetivo específico 3, se llevaron a cabo análisis de las propiedades mecánicas de las arcillas expansivas en su estado natural y con la adición de ceniza volcánica en proporciones que oscilan entre el 5% y el 30%. Los hallazgos indican que, con una adición del 5%, el CBR al 95% de compactación experimentó un incremento marginal de su valor original hasta alcanzar un máximo de 3.34%, mientras que al 100% de compactación se incrementó hasta un 4.04%. A pesar de que estos valores representan una mejora en comparación con el suelo natural, aún no alcanzan el requisito mínimo establecido por el (MTC) ($\geq 6\%$ para subrasantes). El índice de expansión experimentó una disminución marginal del 5%, situándose entre el 3.62% y el 4.03%, lo que señala un impacto positivo inicial, pero insuficiente para alcanzar el límite permitido de 2%. En contraste, el estudio de Vargas [13] evidencia que la estabilización con ceniza volcánica en proporciones superiores (15% a 25%) produce resultados más significativos: el CBR se incrementó en un 61.02% y el índice de expansión se redujo significativamente a 0.304% con únicamente un 15% de adición, lo que satisface de manera satisfactoria los estándares técnicos establecidos. Esto sugiere que la eficacia de la ceniza volcánica como agente estabilizante se potencia con proporciones incrementadas, un fenómeno que se alinea con los hallazgos de este estudio, que demuestran mejoras progresivas a partir de dosis reducidas. Sin embargo, es imperativo continuar evaluando proporciones superiores para lograr resultados óptimos. En suma, ambos estudios corroboran que la ceniza volcánica posee un considerable potencial como estabilizante mecánico en suelos arcillosos, particularmente en el ámbito vial. Además, se trata de un material abundante y sostenible, con un impacto ambiental reducido.

Teniendo en cuenta la relación entre las propiedades mecánicas y físicas de las arcillas expansivas en sus estados natural y estabilizado, se intentó determinar la proporción ideal de ceniza volcánica con referencia al objetivo especificado 4. Según las pruebas realizadas en Calicata 02, la adición de un 30% de ceniza volcánica produjo el mejor equilibrio posible entre resistencia y control de la expansión. El coeficiente de resistencia presentó valores que oscilaron entre el 21,94% y el 22,94% con una compactación del 95% y entre el 25,16% y el 25,79% con una compactación del 100%. Adicionalmente, el índice de expansión se mantuvo por debajo del 2% en prácticamente todas las iteraciones, satisfaciendo los criterios establecidos por el Manual de Construcción para suelos en subrasante. Estos hallazgos permiten postular que el 30% de adición representa el porcentaje óptimo, dado que facilita el logro de niveles apropiados tanto en términos de capacidad de soporte como en control volumétrico, evitando la necesidad de adiciones excesivas del estabilizante. Este descubrimiento presenta paralelismos con los

resultados reportados por Mamani y Yataco [14], quienes emplearon ceniza de madera de fondo en proporciones de 10%, 20% y 30%. En su investigación, el 20% se evidenció como el punto de inflexión más eficaz, alcanzando un CBR de 16.9%, lo que constituye una mejora notable en comparación con el suelo natural (7.7%). Los autores llegan a la conclusión de que los residuos con características cementantes, tales como las cenizas, tienen la capacidad de optimizar significativamente los parámetros mecánicos de los suelos arcillosos, corroborando su potencial como agentes estabilizantes. En consecuencia, ambas investigaciones concuerdan en que la aplicación de cenizas —ya sean de origen volcánico o de biomasa— en proporciones del 20% resulta efectiva para incrementar la resistencia y disminuir la expansión de suelos arcillosos. Esto subraya su factibilidad técnica, económica y ambiental para su aplicación en la construcción de subrasantes, particularmente en regiones con disponibilidad natural de estos materiales, como es el caso de La Victoria – Chiclayo.

Respecto al objetivo 5, el ensayo DCP in situ realizado con un 30% de ceniza volcánica sobre un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) mostró una mejora significativa en la capacidad portante del terreno en comparación con el suelo original. El índice de penetración dinámica (PDC) se redujo, alcanzando valores entre 10.3 y 12.1 mm/golpe, lo que indica una menor deformabilidad del suelo. Además, el CBR estimado aumentó considerablemente, con valores de 21.5% a 100 mm, 20.3% a 200 mm, y 17.9% a 300 mm, lo que confirma el papel estabilizante de la ceniza volcánica. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Vargas [13], quien también utilizó ceniza volcánica para estabilizar suelos arcillosos, obteniendo mejoras en las propiedades mecánicas del suelo. En su investigación, la adición del 20% de ceniza volcánica generó un incremento notable en el CBR, además de una reducción significativa en el índice de expansión. Aunque Vargas empleó diferentes métodos de prueba, sus hallazgos corroboran la efectividad de la ceniza volcánica como estabilizante.

Con respecto al objetivo 6, la evaluación económica evidenció que la implementación de ceniza volcánica como estabilizador implica un costo unitario directo de S/ 93.15 por metro cuadrado, siendo el material el componente más relevante con un costo de S/ 74.60 (2.04 bolsas/m²). La inversión en mano de obra equivale a S/ 1.67, mientras que la utilización de equipos, que abarca herramientas manuales y maquinaria pesada como horno, rodillo vibratorio, motoniveladora con ripper y camión cisterna, incrementa a S/ 16.88.

Aunque la ceniza volcánica ha evidenciado eficacia técnica en la mejora del suelo, su puesta en práctica aún conlleva una inversión significativa en comparación con otros métodos, principalmente debido al costo del material. Este hallazgo indica la necesidad de examinar alternativas para minimizar los costos, tales como modificar la dosificación del insumo o recurrir a fuentes locales de ceniza volcánica que reduzcan el impacto económico del procedimiento.

CONCLUSIONES

La integración de un 30% de cenizas volcánicas en las arcillas expansivas del distrito La Victoria – Chiclayo mejora considerablemente sus características físicas y mecánicas, posibilitando su aplicación como subrasante vial, al aumentar la resistencia (CBR) y a disminuir la expansión del terreno.

En relación con la caracterización del suelo natural, se determinó que el suelo en estudio se clasifica dentro del grupo CH (arcilla de alta plasticidad), con características que restringen su aplicación como subrasante, debido a su bajo CBR y elevada expansión.

En la elaboración de mezclas con variados porcentajes de ceniza volcánica (10%, 20% y 30%), se registró una mejora progresiva, con el 30% constituyendo el porcentaje óptimo que proporciona una mayor resistencia y una reducción en la expansión del suelo.

Las evaluaciones de CBR y expansiones llevadas a cabo en un entorno de laboratorio evidenciaron que con un 30% de ceniza volcánica se lograron valores de CBR de hasta el 25.79% y se disminuyó la expansión hasta un mínimo de 1.62%, cumpliendo con los criterios establecidos por el Manual Tecnológico de la Construcción para subrasantes.

Los ensayos DCP efectuados en el lugar con un 30% de ceniza volcánica corroboraron la optimización de la capacidad portante del suelo, con penetraciones controladas y estimaciones de CBR de hasta 21.5%, lo que evidencia consistencia con los hallazgos de laboratorio.

Según el análisis económico, la ceniza volcánica es el insumo más costoso, y el coste directo por metro cuadrado (S/93,15) es significativo. No obstante, su uso está justificado en lugares donde es necesario estabilizar el suelo para garantizar la longevidad de la carretera.

RECOMENDACIONES

Dado que esta proporción ha demostrado ser adecuada para mejorar la resistencia y minimizar la expansión del suelo, los proyectos de infraestructuras viarias en la CH están aplicando cenizas volcánicas en una proporción del 30% en suelos arcillosos.

Es importante promover el uso de estabilizantes naturales, como la ceniza volcánica, especialmente en zonas donde este material esté fácilmente disponible, lo que además contribuye a reducir el impacto ambiental en comparación con aditivos industriales.

Para futuros proyectos, se sugiere realizar pruebas de control de calidad en campo, como el ensayo con Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP), para asegurar que los resultados obtenidos en laboratorio se reflejen en condiciones reales y se cumplan los estándares técnicos.

El uso de cenizas volcánicas debe considerarse en regiones con alta demanda estructural o criticidad, donde la durabilidad del material y el notable aumento de la capacidad portante del suelo hacen que el gasto inicial merezca la pena. aumento sustancial de la capacidad portante del suelo. Del mismo modo, para ahorrar gastos, se buscarán alternativas para maximizar su obtención y transporte.

Finalmente, se plantea la necesidad de realizar más investigaciones que exploren la combinación de ceniza volcánica con otros aditivos o estabilizantes, con el fin de disminuir costos y maximizar el desempeño del suelo tratado.

REFERENCIAS

- [1] M. Priyanka, S. Shalinee and A. Mittal, "Stabilization of subgrade with expansive soil using agricultural and industrial By-products: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 65, no. 2, pp. 1418-1424, 2022.
- [2] J. Zomberg and G. Roodi, "No AccessUse of geosynthetics to mitigate problems associated with expansive clay subgrades," *Geosynthetics International*, vol. 28, no. 3, pp. 279-302, 2021.
- [3] G. Kumar and S. Harika, "Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, no. 7, pp. 6558-6562, 2021.
- [4] Normas del Reglamento Nacional de Edificaciones(RNE), «E.050 Suelos y Cimentaciones,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>.
- [5] A. Tarazona, «Efectividad del Uso del Cloruro de Calcio en la Estabilización de los Suelos Arcillosos de la Subrasante en el Tramo Nueva Requena - Campo Verde, Ucayali, 2021,» [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional De Ucayali], Pucallpa, 2024.
- [6] L. Quiroz, «Influencia de la Aplicación de Aditivos Químicos en la Estabilización de Suelos Cohesivos para Uso como Subrasante Mejorada de Pavimentos en la Prolongación Avenida Perú de Cajamarca 2021,» [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional De Cajamarca], Cajamarca, 2022.
- [7] D. Tafur, «Evaluación de aditivos Perma Zyme 30x y Conaid para la estabilización de subrasante en vías urbanas no pavimentadas de la urbanización Urrunaga sector 1 en el distrito de José Leonardo Ortiz, Chiclayo 2020,» [Tesis de Pregrado, USAT], Chiclayo, 2021.
- [8] F. Apaza, R. Churata, P. Trupayachi, J. Almirón y F. Velasco, «Estudio de la ceniza de volcanes peruanos como materia prima para la industria de la construcción,» 2018.
- [9] E. Villacis, G. Luna, G. Escadeillas y K. Román, «Estabilización de arcillas expansivas con ceniza volcánica y ceniza de cascarilla de arroz,» ESPOI, 2022.
- [10] A. Subham, A. Mohd, S. Mazhar and O. Mohammed, "Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review," *Results in Engineering*, vol. 22, p. 19, 2024.
- [11] L. Manlin, S. Mohammad, L. Jie, Z. Jiasheng, A. Salpadoru y A. Rajeev, «Evaluation of brown coal fly ash for stabilising expansive clay subgrade: A sustainable solution for pavement construction,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 2024, p. 14, 2024.
- [12] Z. Zimar, D. Robert, A. Zhou, F. Giustozzi, S. Setunge y J. Kodikara, «Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review,» *Journal of Environmental Management*, vol. 312, p. 18, 2022.
- [13] B. Vargas, «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, UPEU], Juliaca, 2020.

- [14] L. Mamani y A. Yataco, «Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho,» [Tesis de Pregrado, USMP], Lima, 2017.
- [15] E. Vilcas, «Estabilización de Suelos Arcillosos Adicionando Ceniza de Ladrillo en Vías no Pavimentadas,» [Tesis de Pregrado, UPLA], Huancayo, 2022.
- [16] Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, «Concepto suelo,» [En línea]. Available: <https://www.icgc.cat/es/Ambitos-tematicos/Suelos/Concepto-suelo>. [Último acceso: 2024 10 27].
- [17] Universidad Nacional de la Plata, «El suelo,» 2015.
- [18] Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, «Sección Suelos y Pavimentos,» MTC, Lima.
- [19] B. Chvez y M. Ocala, «Envejecimiento de arcillas y evaluación de las propiedades físicas y químicas para su aplicación a Procesos Industriales,» [Tesis de Pregrado, UNSA], Arequipa, 2018.
- [20] J. Badillo, *Mecánica de Suelos*, Limusa, 2005.
- [21] C. Villalaz, «Mecánica de suelos y cimentaciones,» Limusa Noriega, 2004.
- [22] A. Castro y E. Scipión, «Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante,» [Tesis de pregrado, UNI], 2017.
- [23] A. Cárdenas y A. Donoso, «Proposición de una metodología particular para obtener la capacidad de soporte para suelos granulares sin curva Proctor definida,» [Tesis de pregrado, Universidad de Magallanes], 2008.
- [24] J. Osorio y A. Casas, «Correlación PDC con CBR para suelos en la localidad de Suba,» [Tesis de Pregrado, Universidad Militar Nueva Granada], 2011.
- [25] MTC, *Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito*, Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008.
- [26] C. Higuera, J. Gómez y O. Pardo, «Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio,» *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 21, n° 32, p. 20, 2013.
- [27] «Ceniza volcánica,» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/ques-la-ceniza-volcanica>. [Último acceso: 2024 10 28].
- [28] A. Guevara, «Estudio de las propiedades de las cenizas del volcán Tungurahua, Ecuador, para identificar los factores que determinan su impacto en suelos y cultivos,» *Research*, 2015.
- [29] ASTM INTERNACIONAL, «Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,» 2022.
- [30] F. Fernandez, «Análisis de propiedades físicas y mecánicas en suelos limo-arcillosos adicionando porcentajes de cenizas de *Schoenoplectus californicus*,» [Tesis de Pregrado, USAT], 2024.
- [31] Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, *Manual de Ensayo de Materiales*, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016.
- [32] ASTM, «Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils,» PDFC.
- [33] ASTM, «Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications,» ASTM, 2023.
- [34] ASTM International, «Normas ASTM,» [En línea]. Available: <https://la.astm.org/es/standards/>. [Último acceso: 04 10 2024].

- [35] C. Tupia y J. Alva, «Evaluación de la capacidad de soporte del terreno por medio de un equipo de penetración dinámica,» 2001.
- [36] J. Malaga, G. Vera y R. Oliveros, «Métodos y estrategias de investigación científica,» 2008.
- [37] C. Ruiz, Metodología de la investigación, Huancavelica: Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, 2022.
- [38] Sigrid, «Mapa geotécnico de la ciudad de Chiclayo,» [En línea]. Available: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/3125>.
- [39] C. Huayta, M. Hadi, C. Rojas y J. Arias, Metodología de la investigación: Guía para el proyecto de tesis, Puno: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C, 2023.
- [40] M. Hadi, C. P. Martel, F. Huayta, C. Rojas and J. Arias, Metodología de la Investigación, Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, 2023.
- [41] J. Rojas y J. Alva, «Arcillas y Lutitas Expansivas en el Norte y Nororiente Peruano,» Huaráz.
- [42] S. Merchan, «Comportamiento de suelos expansivos en cimentaciones superficiales,» 2009.

ANEXOS

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES RUC:20605355189

REPORTE DE MEDICION Y ANALISIS DE MUESTRA POR EL ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL

SOLICITANTE:	RIVERA GUERRERO DENILSO
TESIS:	INFLUENCIA DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS EN LA ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS PARA USO COMO SUBRASANTE EN EL DISTRITO LA VICTORIA-CHILCAYO
MUESTRA:	CENIZA VOLCANICA
FECHA:	25 DE AGOSTO DEL 2024

MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO

1. MUESTRA: Ceniza Volcánica (20. Gr)

Nº DE MUESTRAS	CANTIDAD DE MUESTRA ENSAYADA	PROCEDENCIA
001	400mg	

2. ENSAYOS A APLICAR:

FORPERÚ

ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL
ANÁLISIS TERMOTERMÓGRAFO (TGA)

3. EQUIPO EMPLEADO Y CONDICIONES

LABORATORIO

ANALIZADOR TÉRMICO SIMULTANEO TG-DTA-DSC CAP. MÁX. 1600°C
SETSYS' EVOLUTION; CUMPLE CON NORMAS ASTM ISO 11357, ASTM E967, ASTM E968, ASTM E793; ASTM D3895; ASTM D3417; ASTM D3418; DIN 51004; DIN 51007; DIN 53765.

- TASA DE CALENTAMIENTO: 20 °C/MIN
- GAS DE TRABAJO-FLUJO: NITRÓGENO, 10 ML/MIN
- RANGO DE TRABAJO 25-920°C.
- MASA DE MUESTRA ANALIZADA: 35 MG

JEFE DE LABORATORIO: ING. CARLOS VALQUI MENDOZA
ANALISTA RESPONSABLE: ING. CARLOS VALQUI MENDOZA

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

FORPERÚ

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y RESIDUOS SÓLIDOS

USAT

AGUAS – SUELOS – ALIMENTOS – MINERALES – ACEITES – CARBÓN

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632 CORREO ELECTRÓNICO: Fqaperusac@gmail.com

Scanned with CamScanner

Fig. 35. Resultados del ensayo de espectrometría de rayos x

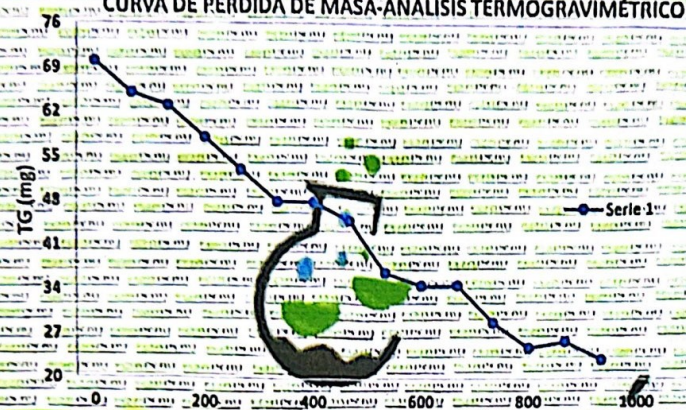
LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES RUC:20605355189

4. RESULTADOS

4.1 CURVA TGA Y ATD

CURVA DE PÉRDIDA DE MASA-ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



FQAPERU

4.2 CONCLUSIONES

Según el análisis Termogravimétrico se muestra la descomposición térmica a través de la pérdida de masa en función a la temperatura indicado dos regiones donde se hace más intensa la pérdida, la primera en un rango entre 350 y 550°C y la segunda menos intensa entre 700 y 800°C., posteriormente la pérdida es gradual. El material llega a perder un aproximado de 17% de masa, respecto a su masa inicial a la temperatura máxima de ensayo.

TRUJILLO, 25 DE AGOSTO DEL 2024



AGUAS - SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITES - CARBON - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632

CORREO ELECTRÓNICO: Fqaperusac@gmail.com

Fig. 36. Curva de pérdida de masa - análisis termogravimétrico

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL-PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES

RUC:20605355189

REPORTE DE MEDICION Y ANALISIS DE MUESTRA POR EL ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL

SOLICITANTE	RIVERA GUERRERO DENILSO
TESIS	INFLUENCIA DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS EN LA ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS PARA USO COMO SUBRASANTE EN EL DISTRITO LA VICTORIA-CHICLAYO
MUESTRA	CENIZA VOLCANICA
FECHA	25 DE AGOSTO DEL 2024

MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO

1. CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES

El análisis se realizó en un espectrómetro de fluorescencia total de rayos x marca

BRUKER, MODELO S2-PICOFOX

Fuente de rayos x: Tubo de Mo

Tiempo de medida: 2000 segundos

ESTANDAR INTERNACIONAL PARA

CUANTIFICACIÓN: Elemento: Galio (Ga)

Concentración: g/lr

2. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Se analizó 75 mg de la muestra de CENIZA VOLCANICA, la cual fue tamizada previamente a malla a 200.

3. METODO

- BASADO EN LA NORMA : ASTM C25
- VOLUMETRIA : USAQ-ME06

JEFE DE LABORATORIO: ING. CARLOS VALQUI MENDOZA

ANALISTA RESPONSABLE: ING. CARLOS VALQUI MENDOZA



TÉCNICO DE: AGUAS – SUELOS – ALIMENTOS – MINERALES – ACEITES – CARBON – CAL

LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES

RUC:20605355189

4. RESULTADOS

COMPOSICIÓN QUÍMICA	UNIDADES	RESULTADOS	METODO UTILIZADO
SILICIO (SiO ₂)	%	43.2	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
ALUMINIO (Al ₂ O ₃)	%	24.7	
CALCIO (CaO)	%	14.1	
SODIO (Na ₂ O)	%	12.3	
MAGNESIO (MgO)	%	8.2	
NIQUEL	ppm	190	
CROMO	ppm	65.8	
PLOMO	ppm	21.2	
HIERRO	ppm		
CINC	ppm		
COBRE	ppm		

5. CONCLUSION

- Al realizar la comparación del espectro de la muestra analizada con las energías características de los elementos de la tabla periódica a partir del sodio, se encontraron, principalmente, Silicio (SiO₂) y Aluminio (Al₂O₃) con un alto porcentaje.

TRUJILLO, 25 DE AGOSTO DEL 2024



TÉCNICO DE LABORATORIO

AGUAS – SUELOS – ALIMENTOS – MINERALES – ACEITES – CARBÓN – CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632

CORREO ELECTRÓNICO: Fqaperusac@gmail.com

Scanned with CamScanner

Fig. 37. Resultados de los componentes químicos de ceniza volcánica

CONFORMIDAD DE ASESOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Chiclayo, 22 de mayo del 2025.

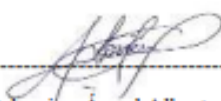
Señores

Roberto Carlos Castillo Velarde
Roberto Carlos Castillo Velarde
Escuela Profesional de Ingeniería Civil -USAT

Presente:

Le expreso mi saludo y en mi condición de asesor doy mi **CONFORMIDAD** a la tesis titulada: **Influencia De Las Cenizas Volcánicas En La Estabilización De Arcillas Expansivas Para Uso Como Subrasante En El Distrito La Victoria-Chiclayo** presentado por el estudiante **Rivera Guerrero Denilso** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil**, de esta manera se cumple con uno de los requisitos para su pase a sustentación del informe de tesis de acuerdo con el art.32 de reglamento de elaboración y sustentación del trabajo de investigación para optar el título profesional.

Atentamente.



Ing. Lorrén Palomino Ángel Alberto
Docente Asesor



UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

- LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS
- CONCRETO Y ASFALTO

INFORME N° LEM USAT 026-2025-I
 FECHA: 21 de Mayo 2025 ,

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ESTUDIANTE: Denilso Rivera Guerrero

TITULO DE LA TESIS: Influencia de las cenizas volcánicas en la estabilización de arcillas expansivas para uso como subrasante en el distrito La Victoria-Chiclayo

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Contenido de humedad
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Hidrometría
- Gravedad Especifica
- Proctor Modificado
- CBR de Laboratorio
- Ensayo de Penometro Dinámico de Cono
- Ensayo para Determinar la Densidad y Peso Unitario del Suelo Insitu Mediante el Método del Cono de Arena
- Ensayo de Espectrometría de Rayos X
- Peso Unitario del Aditivo

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.
 Observación: Adjunto


 Henry Rivadeneyra Oblitas
 Responsable de Lab Ing. Civil


 TÉCNICO DE LABORATORIO

Enlace a ensayos de laboratorio

[https://drive.google.com/drive/folders/1N1JYwog-
 adue68D08XQPBRskVxKJIRH?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1N1JYwog-

 adue68D08XQPBRskVxKJIRH?usp=sharing)