

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN**  
**INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**



**TESIS**

**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO Y  
MICROSTRUCTURAL DE SUELO ARCILLOSO, ESTABILIZADO  
CON ENZIMAS PARA CIMENTACIONES SUPERFICIALES”**

QUE PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**ING. HOZIEL ALFONSO LUGO MARTÍNEZ**

DIRECTORES DE TESIS:

**M.C. ROGER ULISSES HERNÁNDEZ ZAMORA**

**DR. MIGUEL ANTONIO CRUZ CARRILLO**

Culiacán de Rosales, Sinaloa, a 13 de enero del 2025



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios  
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.  
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## UAS-Dirección General de Bibliotecas

### Repositorio Institucional Buelna

#### Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial  
Compartir Igual, 4.0 Internacional



## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo, deseo expresar mi profunda gratitud a **Dios**, quien ha sido mi fortaleza y guía a lo largo de este viaje académico. Sin Su gracia y misericordia, este logro no habría sido posible. Agradezco a Dios por iluminar mi camino, por darme la perseverancia para superar los desafíos y por sostenerme en los momentos de duda y fatiga.

Estoy inmensamente agradecido a mi madre **Ada Gisela Martínez** por ser el pilar de mi vida y siempre apoyarme en las decisiones importantes durante mi desarrollo académico, por haberme forjado como un hombre con valores y principios.

Por siempre motivarme y demostrarme su apoyo incondicional agradezco a mi familia, en especial a mis abuelos **Irma Ríos** y **Gabriel Lugo**.

Quiero agradecer a mi primo **Ivan Ríos** por siempre mostrarse positivamente y transmitirme esas energías en los momentos difíciles, por recordarme el disfrutar los pequeños detalles de la vida y la felicidad que brinda una buena compañía.

A mi mejor amigo **Geovani Jr.** por enseñarme lo que es el sentido de la amistad, agradezco por enseñarme tantas cosas de la vida, eres un ejemplo a seguir como persona y como profesionalista.

A un gran amigo **Benjamín Arredondo** quien me abrió las puertas de su casa y compartió su conocimiento y experiencia, los cuales me ayudaron a culminar de manera satisfactoria esta meta. Gracias por tu amistad.

Agradezco inmensamente al **M.C. Roger Ulisses Hernández Zamora** por orientarme y permitirme trabajar bajo su dirección, por brindarme su paciencia y apoyo incondicional. Sin duda un excelente maestro y profesionalista con una gran responsabilidad ante el ámbito de la investigación. Espero poder colaborar con un gran amigo en trabajos futuros.

Al **Dr. Miguel Antonio Carrillo Cruz** por formar parte de mi trabajo y mostrar disposición en todo momento, por compartir su conocimiento y experiencia. Admiro su gran originalidad y excelente forma de trabajar.

Agradezco al **Dr. José Jorge Chanona Pérez** por permitirme realizar una estancia académica e integrarme dentro de su equipo de trabajo. Por ser una gran persona y brindarme su amistad.

A mi tía **María José Ríos** y al grupo de trabajo de la **Dirección de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa**, por siempre impulsarme y motivarme durante mi trayectoria estudiantil y haber inculcado un espíritu académico.

Al posgrado de **Maestría en Ingeniería de la Construcción**, de la Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa por ser quien me permitió realizar mis estudios en un posgrado de calidad.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento hacia el **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt)** por el apoyo financiero que me permitió desarrollar mis estudios de posgrado y la culminación de esta tesis.

Por permitirme realizar mi estancia y siempre mostrar disposición de apoyo agradezco a la empresa **Ingenium Ingenieros Consultores**. Gracias al **M.I. Ismael Vázquez** y a la **Ing. Clara Bacasegua** por complementar este proyecto de investigación con sus experiencias e ideas constructivas.

A los **maestros en Ingeniería de la Construcción** por compartir de sus conocimientos y por contribuir a mi formación tanto académicamente como personalmente.

A mis **compañeros de la Maestría en Ingeniería de la Construcción** por brindar su confianza y la amistad dentro y fuera de las horas de trabajo del posgrado, por haber compartido su conocimiento y sabiduría.

A todas las personas e instituciones que contribuyeron para que esto fuera posible. De todo corazón, muchas gracias.

## **RESUMEN**

La estabilización de suelos arcillosos ha sido utilizada para mejorar sus propiedades geotécnicas, empleando estabilizadores químicos como la cal, que incrementan la capacidad de carga del suelo y garantizan una mayor estabilidad en las construcciones. Estos aditivos tienen impactos negativos en el medio ambiente, lo que plantea la búsqueda de alternativas más sostenibles sin afectar el desempeño de las edificaciones. Esta investigación evaluó el comportamiento geotécnico de arcillas estabilizadas con enzimas en concentraciones de 2, 4 y 8 % con periodos de curado de 15 y 30 días, analizando su mecanismo de estabilización, microestructura y morfología. Se obtuvieron propiedades índices del suelo, como la granulometría y límites de consistencia. Para la parte geotécnica, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión no confinada y nanoindentación, con los cuales se añadió un diseño de cimentación para el cálculo de la capacidad portante del suelo. Para caracterizar las arcillas, se utilizaron técnicas de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y la difracción de rayos X (DRX), así como la identificación morfológica mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) combinada con espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS). También se realizaron análisis de imagen que proporcionaron datos de entropía y dimensión fractal de la morfología de las arcillas. Se observó un aumento de la resistencia a compresión del suelo con el 2 % de enzima y 15 días de curado, alcanzando un aumento del 108 % en comparación con el suelo no estabilizado. Se identificó la adhesión de grupos funcionales carbonilo a la matriz del suelo, mejorando la cohesión, el módulo de elasticidad y la dureza del suelo. Los resultados indicaron que el mecanismo de estabilización actúa formando una película aglomerante que favorece la disposición entre las partículas del suelo y sus microporos.

**Palabras claves:** Resistencia a Compresión, Cohesión, Compactibilidad, Análisis de Imágenes, Estabilización enzimática.

## **ABSTRACT**

The stabilization of clay soils has been used to improve their geotechnical properties, using chemical stabilizers such as lime, which increase the bearing capacity of the soil and guarantee greater stability in constructions. These additives have negative impacts on the environment, which raises the search for more sustainable alternatives without affecting the performance of buildings. This research evaluated the geotechnical behavior of clays stabilized with enzymes at concentrations of 2, 4 and 8 % with curing periods of 15 and 30 days, analyzing their stabilization mechanism, microstructure and morphology. Soil index properties were obtained, such as granulometry and consistency limits. For the geotechnical part, unconfined compressive strength and nanoindentation tests were performed, with which a foundation design was added to calculate the bearing capacity of the soil. To characterize the clays, Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and X-ray diffraction (XRD) techniques were used, as well as morphological identification by scanning electron microscopy (SEM) combined with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Image analysis was also performed, providing entropy and fractal dimension data of the clays morphology. An increase in the compressive strength of the soil was observed with 2 % enzyme and 15 days of curing, reaching an increase of 108 % compared to the non-stabilized soil. The adhesion of carbonyl functional groups to the soil matrix was identified, improving the cohesion, modulus of elasticity and hardness of the soil. The results indicated that the stabilization mechanism acts by forming an agglomerating film that favors the arrangement between soil particles and their micropores.

**Keywords:** Compressive Strength, Cohesion, Compactibility, Image Analysis, Enzymatic stabilization.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>1.1. Generalidades</b> .....	12
<b>1.2. Planteamiento del problema</b> .....	15
<b>1.3. Hipótesis</b> .....	17
<b>1.4. Objetivos</b> .....	17
1.4.1. Objetivo general .....	17
1.4.2. Objetivos específicos .....	17
<b>1.5 Justificación</b> .....	18
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	20
<b>2.1. Marco conceptual</b> .....	20
2.1.1. El suelo y características de las arcillas .....	20
2.1.2. Propiedades índices del suelo.....	22
2.1.3. Propiedades mecánicas.....	31
2.1.4. Caracterización microestructural y morfológica. ....	33
2.1.5. Estabilización de suelos.....	38
<b>2.2. Estado del arte</b> .....	40
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	45
<b>3.1. Introducción</b> .....	45
<b>3.2. Materiales</b> .....	46
<b>3.3. Métodos</b> .....	47
3.3.1. Preparación e identificación de las muestras.....	47
3.3.2. Determinación de propiedades índice del suelo .....	48
3.3.3. Determinación de propiedades mecánicas .....	51
3.3.4. Caracterización microestructural.....	53
3.3.5. Análisis morfológico .....	53
3.3.6 Cálculo de capacidad portante del suelo .....	54
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	56
<b>4.1. Caracterización del suelo control</b> .....	56
<b>4.2. Resultados de masa volumétrica suelta y compactada</b> .....	58
<b>4.3. Resultados de los límites de consistencia</b> .....	59
<b>4.4. Resultados de la resistencia a compresión no confinada</b> .....	61
<b>4.5. Resultados de Nanoindentación</b> .....	64

<b>4.6. Análisis FT-IR</b> .....	65
<b>4.7. Análisis DRX</b> .....	67
<b>4.8. Resultados del análisis de imágenes</b> .....	70
<b>4.9. Resultados SEM-EDS</b> .....	73
<b>4.10. Dimensionamiento de cimentación y cálculo de capacidad portante del suelo</b> .....	81
<b>4.11. Comparativa de métodos de estabilización de suelos con enzimas, cal y cemento</b> .....	85
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	87
<b>5.1. Conclusiones</b> .....	87
<b>5.2. Recomendaciones</b> .....	88
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	90
<b>7. ANEXOS</b> .....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación SUCS.....	28
Tabla 2. Nomenclatura de muestras.....	48
Tabla 3. Propiedades índices del suelo C. ....	57
Tabla 4. Valores para la masa volumétrica suelta ( $\rho_s$ ) y compactada ( $\rho_c$ ) para los suelos con y sin estabilizar.....	59
Tabla 5. Límites de consistencia de los suelos y su correspondiente clasificación SUCS. ....	60
Tabla 6. Condiciones de ensayo y resultados obtenidos para las arcillas.....	63
Tabla 7. Propiedades micromecánicas del suelo C, E2 y algunas arcillas blandas.....	64
Tabla 8. Distancias interplanares ( $D_{hkl}$ , nm) y un análisis comparativo entre el suelo C contra E2, E4 y E8. ....	69
Tabla 9. Entropía (E) y dimensión fractal (DF) de suelos con y sin aditivo enzimático..	71
Tabla 10. Resultados cuantificados de EDS para C, E2 y E8. ....	79
Tabla 11. Valores de capacidad de carga de las arcillas con los parámetros correspondientes utilizados durante el cálculo.....	82
Tabla 12. Porcentaje de cambios de las pruebas realizadas comparando las muestras estabilizadas contra la muestra control. ....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una muestra de suelo conformado con un sistema de tres fases. Fuente: [7].	20
Figura 2. Representación esquemática de las configuraciones para minerales arcillosos. Fuente: [7].	22
Figura 3. Consistencia de los suelos cohesivos. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 4. Diagrama esquemático de (a) Dispositivo límite líquido, (b) ranurador, (c) Suelo al iniciar la prueba, (d) Suelo al finalizar la prueba. Fuente: [37].	25
Figura 5. Carta de plasticidad. Fuente: [7].	27
Figura 6. Curva carga-penetración y detalles de la prueba de indentación. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 7. Principio de la SEM. Fuente: [47].	37
Figura 8. Diagrama de flujo de actividades a realizar. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 9. Localización de la extracción del suelo. Fuente: [96]	46
Figura 10. Histograma de la distribución de las partículas. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 11. Curva de compactación del suelo C. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 12. Carta de plasticidad utilizada para la identificación de los suelos. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 13. Esfuerzos máximos promedios para las arcillas. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 14. Muestra con presencia de hongos. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 15. Curvas de nanoindentación para el suelo C (a) y E2 (b). Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 16. Espectro FT-IR del aditivo enzimático. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 17. Espectros FT-IR de las arcillas C (a), E2 (b), E4 (c), E8 (d). Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 18. Espectros DRX de los suelos C (a), E2 (b), E4 (c), E8 (d). Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 19. Imágenes de microscopía óptica de suelo C (a), E2-15, E4-15 y E8-15 (b, c y d respectivamente), gráficos de intensidad de superficie 3D de C (h), E2-15, E4-15 y E8-15 (i, j y k respectivamente). Barra de escala de 100 $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 20. Imágenes de microscopía óptica de E2-30, E4-30 y E8-30 (e, f y g respectivamente), gráficos de intensidad de superficie 3D para los suelos E2-30, E-30 y E8-30 (l, m y n respectivamente). Barra de escala de 100 $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia.	73

Figura 21. Imágenes SEM del suelo C, para diferentes aumentos, a) 200X barra de escala 100 $\mu\text{m}$ , b) 500X barra de escala 10 $\mu\text{m}$ , c) 10,000X barra de escala 1 $\mu\text{m}$ , d) 20,000X barra de escala 1 $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia. ....	74
Figura 22. Imágenes SEM del suelo E2, para diferentes aumentos, a) 200X barra de escala 100 $\mu\text{m}$ , b) 500X barra de escala 10 $\mu\text{m}$ , c) 10,000X barra de escala 1 $\mu\text{m}$ , d) 20,000X barra de escala 1 $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia. ....	75
Figura 23. Imágenes SEM del suelo E8, para diferentes aumentos, a) 200X barra de escala 100 $\mu\text{m}$ , b) 500X barra de escala 10 $\mu\text{m}$ , c) 10,000X barra de escala 1 $\mu\text{m}$ , d) 20,000X barra de escala 1 $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia. ....	76
Figura 24. Imágenes SEM con aumento 50,000X barra de escala 100 nm a) suelo C, b) suelo E2, c) suelo E8. Fuente: Elaboración propia. ....	78
Figura 25. Espectros EDS del suelo C (a), E2 (b) y E8 (c). Fuente: Elaboración propia. ....	80
Figura 26. Prueba Proctor Modificado en el suelo C. ....	101
Figura 27. Prueba de límites de Atterberg para C repetición 1. ....	102
Figura 28. Prueba de límites de Atterberg para C repetición 2. ....	103
Figura 29. Prueba de límites de Atterberg para C repetición 3. ....	104
Figura 30. Prueba de límites de Atterberg para E2-15 repetición 1. ....	105
Figura 31. Prueba de límites de Atterberg para E2-15 repetición 2. ....	106
Figura 32. Prueba de límites de Atterberg para E2-15 repetición 3. ....	107
Figura 33. Prueba de límites de Atterberg para E4-15 repetición 1. ....	108
Figura 34. Prueba de límites de Atterberg para E4-15 repetición 2. ....	109
Figura 35. Prueba de límites de Atterberg para E4-15 repetición 3. ....	110
Figura 36. Prueba de límites de Atterberg para E8-15 repetición 1. ....	111
Figura 37. Prueba de límites de Atterberg para E8-15 repetición 2. ....	112
Figura 38. Prueba de límites de Atterberg para E8-15 repetición 3. ....	113
Figura 39. Prueba de límites de Atterberg para E2-30 repetición 1. ....	114
Figura 40. Prueba de límites de Atterberg para E2-30 repetición 2. ....	115
Figura 41. Prueba de límites de Atterberg para E2-30 repetición 3. ....	116
Figura 42. Prueba de límites de Atterberg para E4-30 repetición 1. ....	117
Figura 43. Prueba de límites de Atterberg para E4-30 repetición 2. ....	118
Figura 44. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 3. ....	119
Figura 45. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 1. ....	120
Figura 46. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 2. ....	121
Figura 47. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 3. ....	122

Figura 48. Prueba de compresión no confinada para C repetición 1.....	123
Figura 49. Prueba de compresión no confinada para C repetición 2.....	124
Figura 50. Prueba de compresión no confinada para C repetición 3.....	125
Figura 51. Prueba de compresión no confinada para E2-15 repetición 1.....	126
Figura 52. Prueba de compresión no confinada para E2-15 repetición 2.....	128
Figura 53. Prueba de compresión no confinada para E2-15 repetición 3.....	129
Figura 54. Prueba de compresión no confinada para E4-15 repetición 1.....	130
Figura 55. Prueba de compresión no confinada para E4-15 repetición 2.....	130
Figura 56. Prueba de compresión no confinada para E4-15 repetición 3.....	131
Figura 57. Prueba de compresión no confinada para E8-15 repetición 1.....	132
Figura 58. Prueba de compresión no confinada para E8-15 repetición 2.....	133
Figura 59. Prueba de compresión no confinada para E8-15 repetición 3.....	134
Figura 60. Prueba de compresión no confinada para E2-30 repetición 1.....	135
Figura 61. Prueba de compresión no confinada para E2-30 repetición 2.....	136
Figura 62. Prueba de compresión no confinada para E2-30 repetición 3.....	137
Figura 63. Prueba de compresión no confinada para E4-30 repetición 1.....	138
Figura 64. Prueba de compresión no confinada para E4-30 repetición 2.....	139
Figura 65. Prueba de compresión no confinada para E4-30 repetición 3.....	140
Figura 66. Prueba de compresión no confinada para E8-30 repetición 1.....	141
Figura 67. Prueba de compresión no confinada para E8-30 repetición 2.....	142
Figura 68. Prueba de compresión no confinada para E8-30 repetición 3.....	143

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Generalidades

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI) la ciudad de Culiacán, en un periodo de 20 años (2000-2020), ha tenido un marcado crecimiento en su mancha urbana [1], y con ello ha presentado cambios en el uso de suelo, que conllevan a su degradación. Estos cambios se han generado principalmente en el sector norte de la ciudad, donde anteriormente se encontraban ubicadas zonas de uso agrícola, con tipo de suelo arcilloso predominante. Los suelos agrícolas, además de tener altas concentraciones de materia orgánica y sustancias químicas como residuos de cosecha, fertilizantes y pesticidas, suelen tener una porosidad abundante ya que año con año rompen el estrato y lo mantienen en constante movimiento con la finalidad de airearlo y evitar el crecimiento de plagas y hongos que afecten la productividad del suelo, además las plantas requieren una presión de poro efectiva para que las raíces obtengan los nutrientes necesarios para su desarrollo [2-4].

Los suelos arcillosos están compuestos principalmente por minerales de silicatos de aluminio hidratados, organizados en estructuras laminadas [5]. Estas láminas tienen una estructura cristalina con una disposición de iones, creando una red de poros a diferentes escalas. A nivel microscópico, las partículas de arcilla son delgadas y planas, con espacios interlaminares que forman poros capaces de retener agua, esta porosidad es fundamental para la capacidad de absorción de agua que presentan las arcillas [6].

También es importante mencionar que las arcillas tienen una carga negativa debido a la presencia de iones de aluminio y silicio en su estructura. Esta carga superficial atrae iones positivos ( $\text{Na}^+$  o  $\text{K}^+$ ) y moléculas de agua, que se adhieren a la superficie y llenan los espacios porosos de las partículas [7].

El agua adsorbida en las arcillas influye en el comportamiento volumétrico y su resistencia a compresión. Cuando las partículas son hidratadas se forma una película de agua sobre las láminas de arcillas, lo que provoca una disminución de los esfuerzos cortantes de los granos del suelo. Consecuentemente disminuye su resistencia a la compresión lo cual es

una problemática importante en ingeniería civil y geotécnica, ya que puede provocar fallas y asentamientos no deseados en estructuras construidas sobre estos suelos [8-10].

Las propiedades mencionadas anteriormente hacen que este tipo de suelo, bajo condiciones naturales y la exposición a la temporada de lluvias de la región, no sea factible para su uso en la construcción. En la ingeniería geotécnica se establecen dos condiciones fundamentales para el diseño y construcción de cimentaciones. La primera pertenece al estado límite de falla, haciendo referencia a la capacidad portante de los suelos con una cimentación establecida y la segunda se relaciona al estado límite de servicio, indicando que la cimentación no presenta deformaciones extremas que afecten su funcionamiento [11].

La capacidad portante en suelos arcillosos depende principalmente del valor cohesivo de sus partículas, por lo que es relevante mejorar sus propiedades geotécnicas utilizando técnicas de estabilización que permitan responder a situaciones cada vez más exigentes [12]. Con la finalidad de lograr un mejor desempeño de los suelos para fines de construcción, se han utilizado numerosos materiales y técnicas de estabilización [9]. Los métodos que se utilizan en la estabilización del suelo se dividen en mecánicos y químicos [13]. En el caso del uso de los métodos mecánicos, mejora el desempeño sin alterar su composición química, empleando la fuerza mecánica de maquinaria o herramientas cambiando las propiedades físicas del suelo, como su relación de vacíos.

Por otro lado, con el uso de métodos químicos, se implementan reacciones en la estructura molecular del suelo que conducen a una mejor unión, estructuración y estabilidad [14]. Este tipo de estabilización es subdividido en tradicionales y modernos, y sus diferencias radican en el tipo de material a utilizar como aditivo estabilizador dentro del suelo.

La estabilización química a través de materiales tradicionales incluye la implementación de aditivos comerciales, tales como el cemento y la cal [13]. Sin embargo, además de los costos, la fabricación masiva de estos materiales tiene un impacto negativo en la contaminación del medio ambiente.

En respuesta a estas preocupaciones ingenieriles, ambientales y económicas, se ha explorado en la investigación de alternativas innovadoras como la estabilización del suelo mediante enzimas. Este enfoque emergente promete revolucionar la industria de la construcción al ofrecer una forma más sostenible y menos intrusiva para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos [15].

Las enzimas actúan como catalizadores biológicos que facilitan reacciones bioquímicas en el suelo, mejorando su capacidad de carga y resistencia a los movimientos volumétricos, sin los impactos negativos asociados con los aditivos químicos tradicionales [16-17].

La aplicación de enzimas para la estabilización del suelo no solo podría reducir la huella de carbono provocado por la construcción, sino también optimizar el uso de recursos al utilizar procesos naturales y biológicos.

Para este trabajo de investigación se utilizó una solución a base de enzimas conformado por lipasas, quitinasas y proteasas, las cuales reaccionan con las partículas del suelo generando una red de componentes carbono-hidrogeno y carbonilo que interactúan y se fijan con los iones de sílice, ocasionando una aglomeración en las partículas del suelo y con ello reduciendo los microporos, obteniendo una mejor compactibilidad y mayores valores de cohesión.

El objetivo principal de este estudio fue correlacionar las propiedades geotécnicas con la caracterización microestructural y morfológica de suelos arcillosos estabilizados con enzimas. Se implementaron tres diferentes dosificaciones de enzimas: 2, 4 y 8 % en relación con el contenido de humedad óptimo del suelo, y se evaluaron dos períodos de curado a 15 y 30 días, como parte de la metodología. Se llevaron a cabo pruebas para determinar las propiedades índices del suelo y su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como lo son granulometría, límites de consistencia, masa volumétrica suelta y compactada. Además, se realizó la prueba de compresión no confinada y nanoindentación para obtener las propiedades mecánicas de los suelos con y sin estabilización enzimática.

Para la caracterización microestructural, se emplearon técnicas de DRX y FT-IR, mientras que para la identificación de la morfología se obtuvieron imágenes microscópicas (SEM-EDS y ópticas), junto con un análisis de imágenes para determinar valores de entropía y dimensión fractal. Finalmente, se presenta una propuesta de cimentación superficial tipo zapata aislada para analizar la capacidad de carga del suelo, conforme a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones del Gobierno de la Ciudad de México (NTC-DCC)[11].

Este trabajo de investigación presenta una estructura que comienza con la exposición del problema a abordar, seguido por los objetivos, la formulación de la hipótesis y su correspondiente justificación. Además, incluye secciones dedicadas al marco teórico y estado del arte, la metodología utilizada, los resultados obtenidos y sus discusiones. Finalmente, se muestran las conclusiones y recomendaciones, acompañadas de un apartado de referencias bibliográficas y anexos.

## **1.2. Planteamiento del problema**

La baja resistencia a la compresión de las arcillas presenta una problemática en la construcción y la ingeniería geotécnica. Este aspecto compromete la estabilidad de las estructuras construidas sobre este tipo de suelos, ya que son susceptibles a fallas estructurales y asentamientos excesivos.

La baja resistencia a la compresión limita la capacidad portante del suelo, lo que restringe las aplicaciones de estos suelos en proyectos de ingeniería civil. Para mitigar esto se emplean distintas estrategias, una de ellas es construir cimentaciones superficiales más robustas o profundas, lo que implica un incremento en los costos y complejidad de los proyectos, otra estrategia es el mejoramiento del suelo; sin embargo en la actualidad se utilizan estabilizadores químicos a base de materiales tradicionales: cemento y cal, los cuales han demostrado tener un impacto negativo en la preservación del medio ambiente.

La producción de cemento es considerada una de las industrias con mayor emisión de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a nivel mundial. El proceso de fabricación emite alrededor de 900 kg de  $\text{CO}_2$  por tonelada de cemento producida [18], lo que constituye alrededor del 5–7 % de las emisiones antropogénicas globales de  $\text{CO}_2$  [19-20]. El sector de la

producción de cal utiliza una cantidad de energía que representa hasta un 60 % de los costes totales de producción. Los hornos se alimentan con combustibles gaseosos (como gas natural, gas de coque), combustibles sólidos (como carbón, coque o antracita) y combustibles líquidos. Además, se emplean distintos tipos de residuos como combustibles, por ejemplo, aceite, plásticos, papel, harina animal, aserrín [21].

La otra vertiente de la estabilización química incluye los llamados materiales modernos, que abarcan polímeros, sales, aditivos ionizados y enzimas. Estas técnicas presentan una huella de carbono menor en comparación con las tradicionales, además de que al utilizar estos materiales modernos se reducen la recolección de los materiales tradicionales los cuales están expuestos a un deterioro económico permanente, como la pérdida de biodiversidad, la degradación de la vegetación, destrucción de ecosistemas, daños a ríos y contaminación por polvo [22]. A pesar de que estas técnicas modernas muestran más promesas, muchos profesionales del área de la construcción siguen optando por métodos tradicionales. Esto se debe principalmente a la falta de un conocimiento claro sobre los procesos y mecanismos de estabilización basados en enzimas. Por lo tanto, es crucial aumentar la publicación y difusión de información sobre estas técnicas para fomentar su adopción y contribuir así en las prácticas más sostenibles en la industria de la construcción. Así mismo, es importante encontrar balance entre la problemática de edificar sobre suelos inestables y el impacto que ocasiona producir y utilizar los materiales empleados como estabilizadores de arcillas, con la finalidad de atender problemáticas de contaminación del suelo, agua y aire en sistemas socioecológicos. Por lo anterior mencionado, la estabilización con enzimas emerge como un enfoque innovador frente a los métodos tradicionales, ofreciendo una solución prometedora para la construcción sobre suelos arcillosos inestables [23].

La baja resistencia a la compresión de las arcillas dificulta la estabilidad de las estructuras y requiere la estabilización del suelo. Sin embargo, los estabilizadores tradicionales como el cemento y la cal tienen un impacto ambiental negativo, por lo que el uso de materiales modernos como enzimas ofrece una alternativa más sostenible al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y los daños ecológicos.

### **1.3. Hipótesis**

La implementación de una solución enzimática en el suelo arcilloso modificará su microestructura, aumentará su compactibilidad y resistencia a compresión, características necesarias para implementarlos en el diseño y construcción de cimentaciones superficiales, y ofrecerá una alternativa sostenible frente a los estabilizadores tradicionales.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar el comportamiento mecánico, microestructural y morfológico de suelos arcillosos estabilizados con enzimas, mediante pruebas de laboratorio, técnicas FT-IR, DRX y de microscopía para determinar si es factible implementarlo en cimentaciones superficiales.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la resistencia al corte de los suelos, comparando los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a compresión no confinada, para determinar la dosificación óptima del aditivo enzimático y tiempo de curado que mejore esta propiedad mecánica de las arcillas estabilizadas.
- Comparar la compactibilidad entre suelos con y sin aditivo enzimático mediante el cálculo de masas volumétricas compactadas y análisis de imágenes utilizando el programa ImageJ, para evaluar cual es la influencia en las propiedades de compactación del suelo.
- Caracterizar la microestructura de las arcillas con y sin aditivo enzimático, para comprender el mecanismo de estabilización del suelo con la ayuda de diferentes técnicas de espectroscopía (FT-IR y DRX).
- Examinar la morfología de los suelos mediante técnicas de microscopía (Óptica y SEM-EDS) para describir la textura de los suelos.
- Analizar la capacidad portante de suelos estabilizados para identificar la combinación de suelo-enzima que maximice esta capacidad, con la propuesta de una cimentación superficial (zapata aislada) y cálculos establecidos en las normas NTC-DCC.

## 1.5 Justificación

El suelo desempeña un papel fundamental como elemento de soporte en las cimentaciones, siendo sus propiedades determinantes para la estabilidad de las estructuras. Las cargas se transmiten a través de la cimentación, generando tensiones y deformaciones que dependen tanto de la magnitud de la carga como de las características del terreno [24].

Los aditivos estabilizadores basados en enzimas representan una alternativa económica y sustentable para mejorar las arcillas en comparación con los métodos tradicionales [8]. Por lo tanto, investigar el comportamiento de estas enzimas es crucial para el desarrollo de proyectos que contribuyan al Programa Nacional Estratégico en Sistemas Socioecológicos y Sustentables (Pronaces-SSyS).

A pesar de las ventajas de las enzimas, persisten dudas entre los ingenieros sobre su efectividad práctica. Esto se debe en parte a la falta de comprensión del mecanismo de estabilización y a la escasa evaluación a largo plazo de las arcillas expansivas tratadas con enzimas, así como al impacto de las fluctuaciones de humedad [8].

Los cambios en las propiedades geotécnicas, como la plasticidad, resistencia a la compresión no confinada y compactación, están estrechamente relacionados con la textura y estructura microscópica de las muestras de arcilla [25]. Por lo tanto, es crucial analizar la microestructura interna del suelo y evaluar su comportamiento geotécnico de manera integral.

El objetivo principal de este proyecto de investigación es determinar estas propiedades en arcillas estabilizadas con enzimas y compararlas con muestras de suelo no tratado, para mejorar la comprensión del mecanismo de estabilización, las dosificaciones adecuadas y los tiempos de curado asociados a esta técnica innovadora.

Los principales beneficiarios serán las empresas constructoras que empleen esta técnica en suelos arcillosos, ya que podrían reducir costos al evitar la compra y transporte de grandes volúmenes de materiales de relleno y poder utilizar el suelo nativo de la región, a pesar de tener propiedades geotécnicas insuficientes para desarrollar las obras civiles. Además, la sociedad se beneficiaría al evitar fallas estructurales y asentamientos

causados por la resistencia a compresión y, consecuentemente, por una baja capacidad portante del suelo, lo cual reduce los costos de mantenimiento y rehabilitación con un impacto económico significativo.

Además, al implementar esta estabilización con enzimas que se obtienen de fuentes renovables se reduciría el impacto ambiental en comparación con estabilizadores tradicionales como el cemento, que es un material no renovable y que afecta directamente a los ecosistemas de la región. El cemento y la cal requieren más energía durante su producción y transporte, por lo cual al implementar enzimas como estabilizadores del suelo también se reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con su fabricación [18].

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco conceptual

El presente marco teórico tiene como finalidad establecer fundamentos conceptuales del suelo, propiedades y características, así como las técnicas y equipos para caracterizar las propiedades mecánicas, microestructurales y morfológicas de las arcillas. También se presentan los diferentes tipos de estabilización. Se revisan los estudios previos sobre la efectividad y aplicación de la estabilización química con enzimas en diferentes contextos geotécnicos.

De esta forma, este marco teórico proporcionará la base necesaria para comprender las opciones disponibles y justificar la elección de la metodología en la investigación actual.

#### 2.1.1. El suelo y características de las arcillas

Existen diversas interpretaciones de la palabra "suelo", dependiendo de la aplicación que el profesional tenga en mente. Desde una perspectiva ingenieril, se define como agregados de partículas minerales que, junto con el aire y/o agua en los espacios vacíos, conforman un sistema de tres fases (Figura 1).

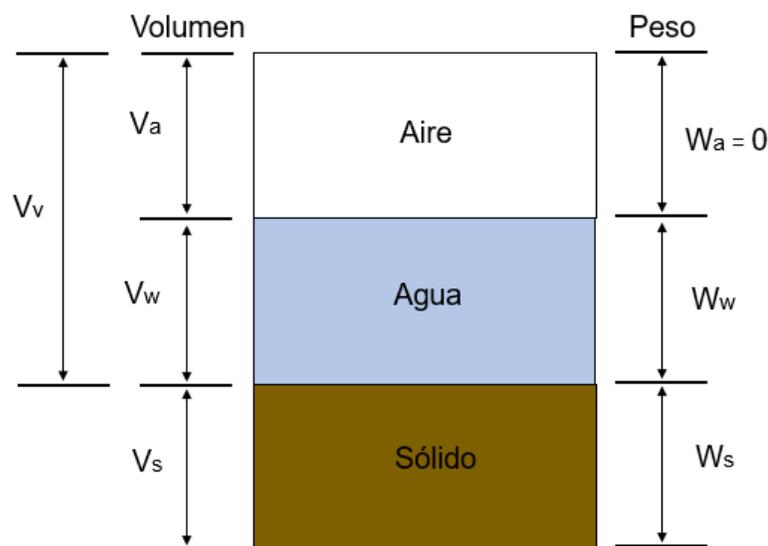


Figura 1. Esquema de una muestra de suelo conformado con un sistema de tres fases.  
Fuente: [7].

Un mineral se define como un sólido inorgánico natural que presenta una estructura interna ordenada y una composición química definida. Está compuesto por átomos dispuestos de manera ordenada y químicamente unidos para formar una estructura cristalina específica. La disposición interna de los átomos en compuestos iónicos está influenciada en parte por la carga de los iones involucrados [26]. Los suelos cubren una extensa porción de la superficie terrestre y se emplean ampliamente como materiales de construcción y cimentación [27].

La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, la intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Así la partícula atrae a los iones positivos del agua ( $H^+$ ) y a cationes de diferentes elementos químicos [7].

Las moléculas de agua son polarizadas, lo que significa que no coinciden los centros de gravedad de sus cargas negativas y positivas, sino que funcionan como pequeños dipolos permanentes. Cuando se unen a una partícula por su carga positiva (+), el polo de carga negativa (-) puede actuar como un punto de atracción para otros cationes positivos. Estos cationes a su vez atraen moléculas de agua debido a la naturaleza polar de estas últimas, permitiendo que cada catión tenga un volumen de agua alrededor de él. La cantidad de agua adsorbida por cada catión aumenta conforme a su carga eléctrica y a su radio iónico [7], [28]. Las propiedades físico-químicas de las arcillas se derivan del tamaño de sus partículas (inferiores a 0.002 mm), morfología y sustituciones isomórficas [29].

Las arcillas están constituidas principalmente por silicatos de aluminio hidratados, que pueden variar al incluir silicatos de magnesio, hierro u otros metales. Estos materiales presentan una estructura donde los átomos se organizan en laminas. Los minerales de arcilla se clasifican generalmente en tres grupos principales: caolinitas, montmorilonitas e ilitas. Las caolinitas están compuestas por una lámina de sílice y otra de alúmina que se superponen de manera indefinida. Por otro lado, las montmorilonitas tienen una lámina de alúmina intercalada entre dos láminas de sílice, también superponiéndose indefinidamente. Las ilitas, debido a su estructura interna, tienden a formar agregados compactos que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen, lo que las hace

menos expansivas que las montmorilonitas [7]. La Figura 2 representa un esquema de las configuraciones para minerales arcillosos.

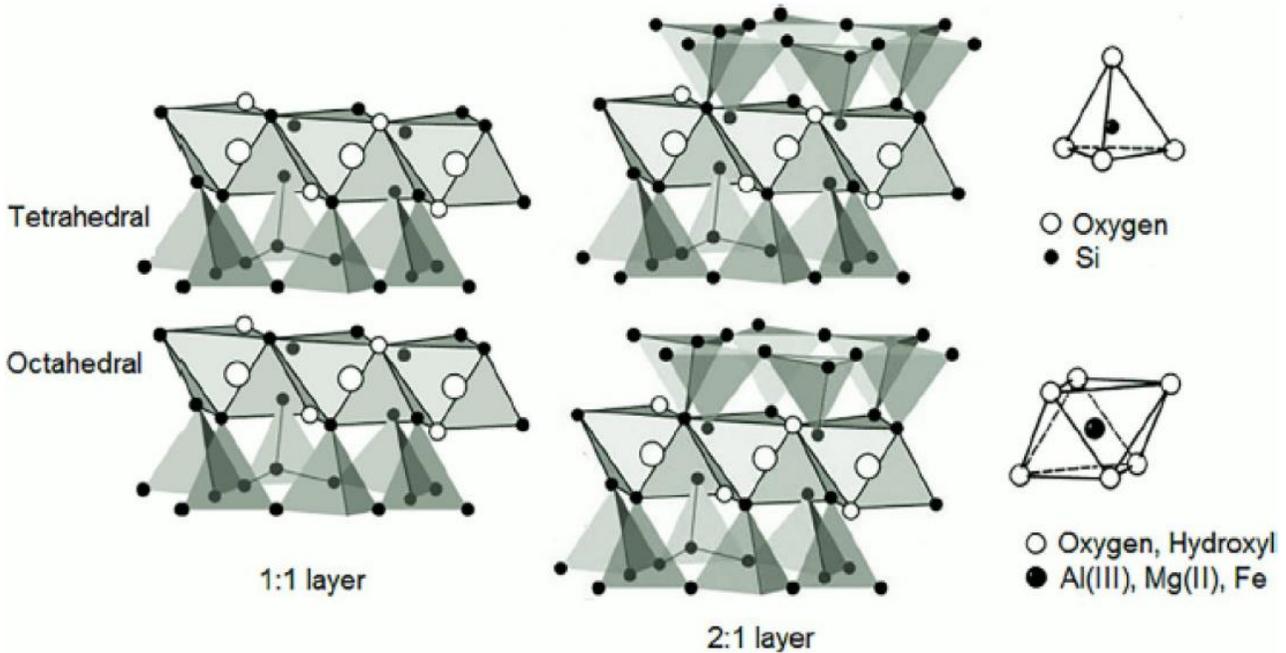


Figura 2. Representación esquemática de las configuraciones para minerales arcillosos. Fuente: [7].

## 2.1.2. Propiedades índices del suelo.

### 2.1.2.1. Granulometría

Para determinar la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra de suelo, se realiza la separación por medio de cedazos o tamices. Este proceso se denomina análisis granulométrico, el cual permite conocer la distribución por tamaños de las partículas presentes en la muestra de suelo [30].

Para un análisis más preciso se pueden emplear equipos digitales como un Mastersize 3000, los cuales utilizan la difracción laser para la distribución de tamaños. Este equipo utiliza un láser para iluminar las partículas suspendidas en un líquido dispersante. Las partículas dispersas interactúan con el láser y difractan la luz en diferentes ángulos, lo que permite al detector del equipo Mastersizer 3000, este equipo mide el patrón de dispersión. A partir de estos datos, el equipo calcula el tamaño de las partículas mediante técnicas de análisis avanzadas, como la transformada de Fourier, proporciona

información precisa sobre la distribución del tamaño de las partículas en la muestra analizada mediante un histograma [31].

#### 2.1.2.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad se define como la proporción de agua presente en relación con la masa de sólidos o el volumen analizado. Se expresa en porcentaje y representa la relación entre el peso del agua contenida en el espécimen y el peso de los sólidos presentes [32].

#### 2.1.2.3. Contenido de humedad óptimo

Es el contenido de humedad el cual el suelo alcanza la masa volumétrica seca máxima utilizando la metodología según aplicada en la norma ASTM D698 [33].

#### 2.1.2.4. Masa volumétrica seca máxima

Es la masa de suelo seco por unidad de volumen que ocupa después de que el suelo ha sido compactado bajo condiciones específicas de humedad y esfuerzos [33].

#### 2.1.2.5. Masa volumétrica suelta

Es la masa de suelo seco por unidad de volumen que ocupa cuando se permite que el suelo se asiente naturalmente, sin aplicar compresión externa [34].

#### 2.1.2.6. Masa volumétrica compactada

Es la masa de suelo seco por unidad de volumen que ocupa cuando se somete a un esfuerzo de compactación estándar o específico. Se determina llenando un cilindro o molde volumétrico con suelo suelto y compactándolo mediante un proceso controlado [34].

#### 2.1.2.7. Compactibilidad del suelo

La compactibilidad se define como el aumento de la masa volumétrica de un suelo a medida que se incrementa la tensión aplicada. Diversos factores influyen en este proceso, tales como la textura del suelo, la masa volumétrica, la estabilidad estructural y el contenido de materia orgánica [35]. Una medida para determinar la capacidad de compactación y fluidez de los materiales en estado polvo es el coeficiente de Hausner, el

cual es la relación de la masa volumétrica compactada y la masa volumétrica suelta del polvo [36].

#### 2.1.2.8. Límites de consistencia

Atterberg, un científico sueco, desarrolló un método para describir los límites de consistencia de los suelos de grano fino en función del contenido de humedad. Estos límites son el límite líquido (LL), límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP).

El LL se define como el contenido de humedad, en porcentaje, al cual el suelo cambia de un estado líquido a un estado sólido. El contenido de humedad (en porcentaje) en el que el suelo cambia de un estado plástico a un estado sólido se definen como el LP. El IP se define como una medida de plasticidad de un suelo fino, evaluando la capacidad para deformarse sin romperse en un estado plástico [7](Figura 3). Los límites de Atterberg de un suelo cohesivo dependen de varios factores, como la cantidad y el tipo de minerales arcillosos y el tipo de catión adsorbido [27].

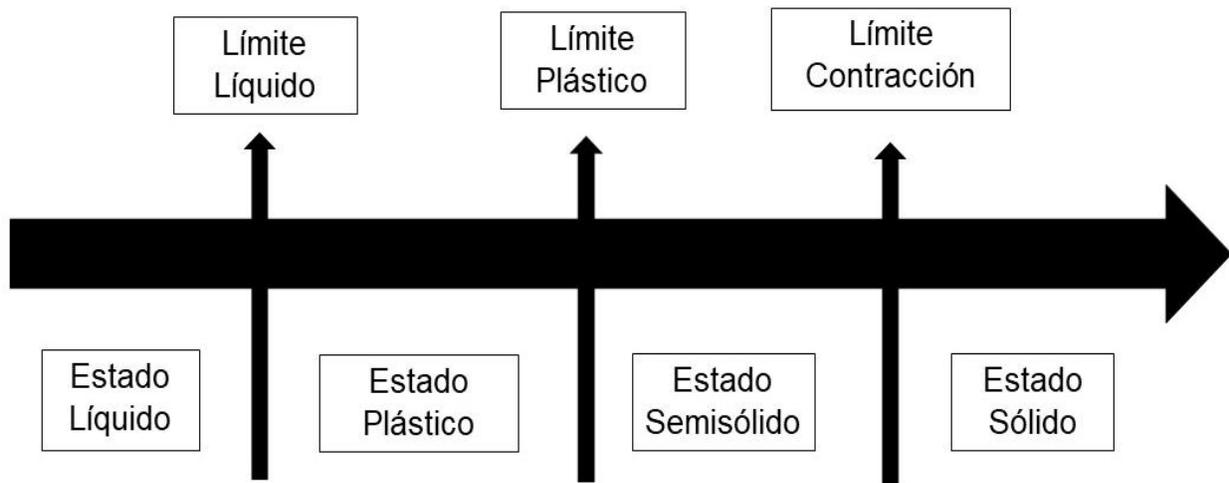


Figura 3. Consistencia de los suelos cohesivos. Fuente: Elaboración propia.

El LL de un suelo generalmente está determinado por la copa de Casagrande. En la figura 4 se muestra un diagrama esquemático (vista lateral) del dispositivo para determinar el LL. Este dispositivo consta de una copa de latón y una base de goma dura. La copa de latón se deja caer sobre la base mediante la acción de una manivela.

Para realizar la prueba de LL, se debe colocar una pasta de suelo en la copa y luego se corta una ranura en el centro de la capa de suelo con la herramienta de ranurado estándar. Al accionar la manivela, la copa se levanta y se deja caer desde una altura de 10 mm. El contenido de humedad requerido para cerrar una ranura de 12.7 mm a lo largo de su fondo después de 25 golpes se denomina LL. Ajustar el contenido de humedad del suelo para cumplir con los requisitos es un proceso difícil. Se realizan mínimo tres repeticiones de la prueba con diferentes contenidos de humedad para el mismo suelo, obteniendo el número de golpes (N) necesarios para cerrar la ranura en una aproximación de humedad del 15, 25 y 35 %. La relación entre el contenido de humedad y N se aproxima a una línea recta, conocida como curva de flujo. El contenido de humedad correspondiente al número de 25 golpes, obtenido de la curva de flujo, define el LL del suelo [37].

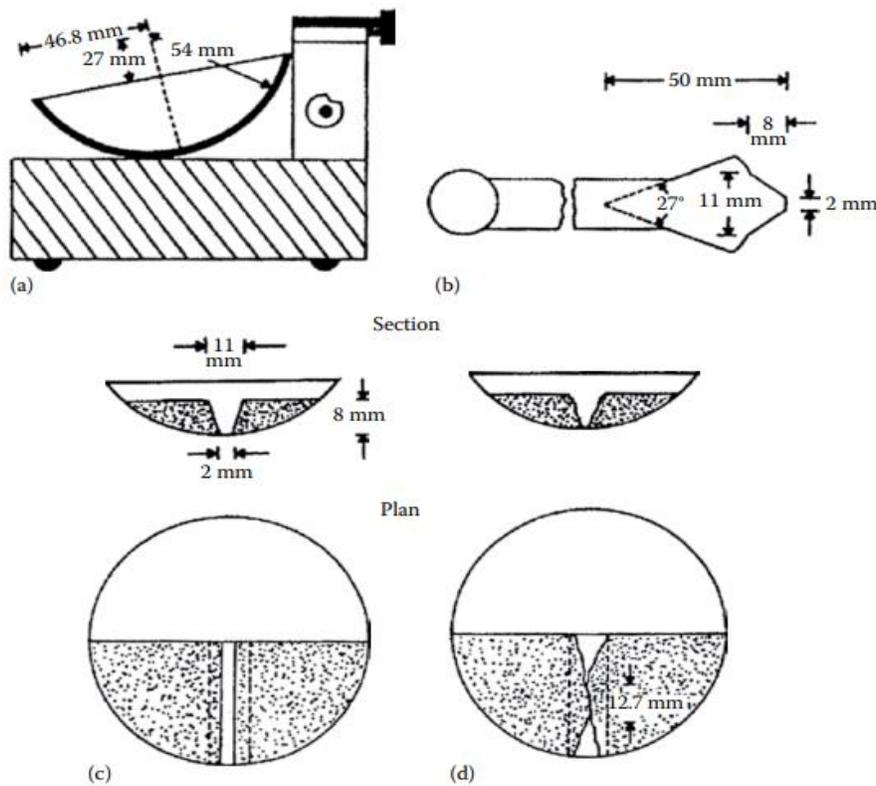


Figura 4. Diagrama esquemático de (a) Dispositivo límite líquido, (b) ranurador, (c) Suelo al iniciar la prueba, (d) Suelo al finalizar la prueba. Fuente: [37].

El LP se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje, en el cual el suelo se desmorona al ser enrollado en hilos de 3.2 mm de diámetro. Este límite representa el punto más bajo del estado plástico del suelo. La prueba de determinación

del LP es sencilla y consiste en el laminado repetido de una masa de suelo de forma elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado [37].

El índice de plasticidad se calcula entre la diferencia del LL y el LP. Los valores ayudan a clasificar el nivel de plasticidad de los suelos finos. Un IP menor a 7 indica una baja plasticidad y tiende a comportarse de manera más rígida cuando está húmedo, mientras que un IP con 7 o más indica que el suelo tiene alta plasticidad y puede deformarse cuando está húmedo.

#### 2.1.2.9. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

La clasificación SUCS es un sistema usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede aplicarse a la mayoría de los materiales no consolidados y se representa mediante un símbolo con dos letras, cada letra esta descrita debajo. Para clasificar el suelo, primero se debe realizar una granulometría del suelo mediante tamizado.

Los suelos se dividen en dos categorías principales: partículas gruesas y finas. Si el suelo contiene más del 50 % de partículas retenidas en una malla de 0.075 mm, se considera un suelo grueso; si el suelo contiene más del 50 % de partículas menores a 0.075 mm, se clasifica como suelo fino.

Dentro de la categoría de suelos gruesos, se pueden obtener gravas siempre que el suelo contenga más del 50 % de partículas mayores de 4.75 mm, mientras que las arenas se clasifican al contener más del 50 % de 0.075 mm a 4.75 mm. Existe la posibilidad de tener suelos con ambas mezclas de grava y arena; sin embargo se clasifica según cual predomina, como por ejemplo grava-arenosa (GW, GP). También se pueden clasificar con un porcentaje bajo o alto de fino (GM, GC) y será necesario identificar qué tipo de fino se tiene mediante la ubicación del IP en la carta de plasticidad de Casagrandes. El mismo procedimiento es aplicado para la identificación de la categoría de arenas.

En cuanto a los suelos finos, se pueden obtener limos y arcillas, que se identifican en la carta de plasticidad de Casagrande. Calculando el IP y verificando si su valor queda por debajo de una frontera o línea llamada "A" son llamados limos. Los valores de IP que quedan por encima de la línea "A" se clasifican como arcillas. Es importante para su clasificación identificar el LL, ya que si contiene un valor mayor a 50 %, se consideran suelos con alta plasticidad (CH, MH), mientras que si no se supera ese límite se consideran de baja plasticidad (CL, ML). Existen otras variaciones de estas categorías en función del contenido orgánico, el cual se identifica de forma visual o con un análisis de pH o de materia orgánica [38](Figura 5) (Tabla 1).

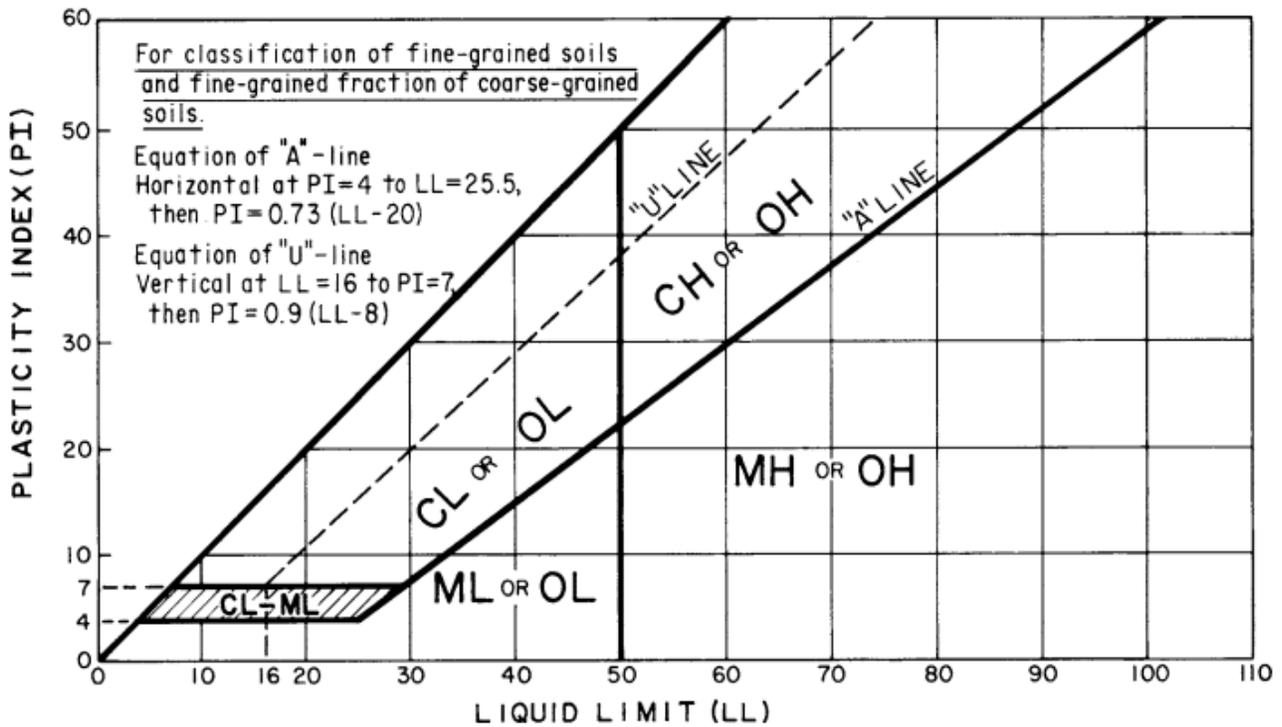


Figura 5. Carta de plasticidad. Fuente: [7].

Tabla 1. Clasificación SUCS.

GRUPOS		SÍMBOLO GIA	NOMBRE DE GRUPO	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN		
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b> (más del 50 % es retenido en el tamiz No 200) > 50% Ret. N° 200	Gravas Limpias (menos de 5% de finos)	<b>GW</b>	Grava bien graduada	Granulometría	Cu > 4 y 1 < Cc < 3	
		<b>GP</b>	Grava mal graduada		Cu < 4 y/o 1 > Cc > 3	
	Gravas con finos (más de 12% de finos)	<b>GM</b>	Grava limosa	Los finos se ubican en la zona de LIMOS (ML) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
		<b>GC</b>	Grava arcillosa	Los finos se ubican en la zona de ARCILLA (CL) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
		<b>GC-GM</b>	Grava limosa arcillosa	Símbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL-ML) de la carta de plasticidad de Casagrande.		
	Gravas con 5 a 12% de finos (símbolo dual)	<b>GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC</b>	Grava bien graduada-limo Grava bien graduada- arcilla Grava mal graduada -limo Grava mal graduada-arcilla	Granulometría( Cc, Cu) y plasticidad ( Carta de Plasticidad)  Símbolo dual		

Fuente: [38].

Tabla 1. Clasificación SUCS. Continuación.

GRUPOS		SÍMBOLO	NOMBRE DE GRUPO	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN			
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b> (más del 50 % es retenido en el tamiz No 200) > 50% Ret. N° 200	<b>ARENAS</b> (50% o más de la fracción gruesa pasa el tamiz No 4) ≥50% F.G. Pasa Tamiz N° 4	Arenas Limpias (poco o ningún fino)	<b>SW</b>	Arena bien graduada	Granulometría	Cu > 6 y 1 < Cc < 3	
			<b>SP</b>	Arena pobremente graduada		Cu < 6 y/o 1 > Cc > 3	
		Arenas con finos (más de 12% de finos)	<b>SM</b>	Arena limosa	Los finos se ubican en la zona de LIMOS (ML) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
			<b>SC</b>	Arena arcillosa	Los finos se ubican en la zona de ARCILLA (CL) en la Carta de Plasticidad de Casagrande		
			<b>SC-SM</b>	Arena limosa arcillosa	Símbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL-ML) de la carta de plasticidad de Casagrande.		
		Arenas con 5 a 12 % de finos (símbolo dual)	<b>SW-SM</b> <b>SW-SC</b> <b>SP-SM</b> <b>SP-SC</b>	Arena bien graduada-limo Arena bien graduada-arcilla Arena mal graduada-limo Arena mal graduada-arcilla	Granulometría( Cc, Cu) y plasticidad ( Carta de Plasticidad)		

Fuente: [38].

Tabla 1. Clasificación SUCS. Continuación.

GRUPOS		SÍMBOLO GIA	NOMBRE DE GRUPO	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN
<b>SUELOS DE GRANO FINO</b> (50 % o más pasa el tamiz No 200) $\geq 50\%$ Pasa N° 200	<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Límite Líquido < 50%	<b>CL</b>	Arcilla de baja plasticidad	IP >7 y cae en o sobre la línea A
		<b>ML</b>	Limo	IP < 4 o cae bajo la línea A
		<b>CL-ML</b>	Arcilla limosa	$4 \leq IP \leq 7$ , Símbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL-ML).
		<b>OL</b>	Arcilla o limo orgánico	Ubicar IP en Carta Plasticidad L.L (secado al horno) / L.L (sin secado al horno) < 0.75
	<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Límite Líquido $\geq 50\%$	<b>CH</b>	Arcilla de alta plasticidad	IP cae en o sobre la línea A
		<b>MH</b>	Limo elástico	IP cae bajo de la línea A
		<b>OH</b>	Arcilla o limo orgánico	Ubicar IP en Carta Plasticidad

Fuente: [38].

### 2.1.3. Propiedades mecánicas

#### 2.1.3.1. Resistencia a compresión no confinada

La resistencia a compresión no confinada es una de las pruebas más utilizadas en la ingeniería civil, geotécnica y materiales para determinar las propiedades de un material mediante la aplicación de cargas compresivas [39]. El objetivo principal de la prueba es determinar propiedades físicas y mecánicas, tales como la resistencia a la compresión, la deformación y el módulo de elasticidad [40].

#### 2.1.3.2. Cohesión

Según la teoría de Terzaghi, al aplicar una carga axial en suelos cohesivos como las arcillas, se generan esfuerzos efectivos que se atribuyen a una propiedad denominada cohesión, la cual surge de las fuerzas internas del suelo [7], [28]. Terzaghi fue pionero en explicar cómo estas fuerzas internas contribuyen significativamente a la resistencia del suelo frente a cargas externas, estableciendo así un concepto fundamental en la mecánica de suelos.

#### 2.1.3.3. Capacidad portante del suelo

Se refiere a la capacidad máxima que tiene el suelo para soportar cargas aplicadas sin sufrir un hundimiento excesivo o fallos estructurales. Depende de la resistencia y características del suelo, como su clasificación (arcilloso, arenoso, etc.), densidad, humedad, y composición. Se obtenida mediante pruebas geotécnicas específicas que evalúan la resistencia y compresibilidad del suelo bajo cargas controladas. Este parámetro se utiliza para revisar la seguridad de las cimentaciones de las obras civiles. Las variables necesarias para el cálculo de este parámetro en suelos cohesivos son la cohesión, dimensiones (ancho, largo y profundidad de desplante), factores de resistencia y acciones de diseño con sus respectivos factores de carga [11].

#### 2.1.3.4. Nanoindentación

La nanoindentación es una técnica utilizada para medir la dureza y otras propiedades mecánicas de materiales a escalas micro y nanométricas. Esta técnica consiste en

aplicar una punta dura y afilada sobre la superficie del material con una carga controlada, para después medir la profundidad de penetración. El modelo de Oliver y Pharr se basa en la relación de la carga aplicada y la profundidad de indentación, aplicando una ecuación empírica que relaciona la dureza del material con la carga y dimensiones de la indentación [41]. Este modelo también permite calcular el módulo de elasticidad efectivo del material a partir de la pendiente inicial de la curva carga-profundidad en la región elástica, como se muestra en las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5.

$$H = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_c} \quad (1)$$

$$Er = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A_c}} S \quad (2)$$

$$A_c = 24.5 h_c^2 + \sum_{i=0}^7 C_i h_c^{1/2} \quad (3)$$

$$h_c = (h_{m\acute{a}x} - h_s) \quad (4)$$

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{m\acute{a}x}}{S} \quad (5)$$

Donde:

$H$  = Dureza (GPa).

$P_{m\acute{a}x}$  = Carga máxima aplicada ( $\mu\text{N}$ ).

$A_c$  = Área de contacto proyectada entre el penetrador y la muestra ( $\text{nm}^2$ ).

$Er$  = Modulo elástico (GPa).

$\beta$  = Factor de corrección adimensional para la forma de la punta del indentador (adimensional).

$S$  = Rigidez del contacto, definida como la pendiente de la curva de descarga (N/m).

$C_i$  = Coeficiente determinado por el uso del tipo de punta (adimensional).

$h_c$  = Profundidad de contacto (nm).

$h_s$  = Desplazamiento de la superficie en el perímetro de contacto (nm).

$\varepsilon$  = Constante que depende de la geometría de la punta del penetrador (adimensional).

$h_{m\acute{a}x}$  = Profundidad máxima de indentación (nm).

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la curva carga-penetración.

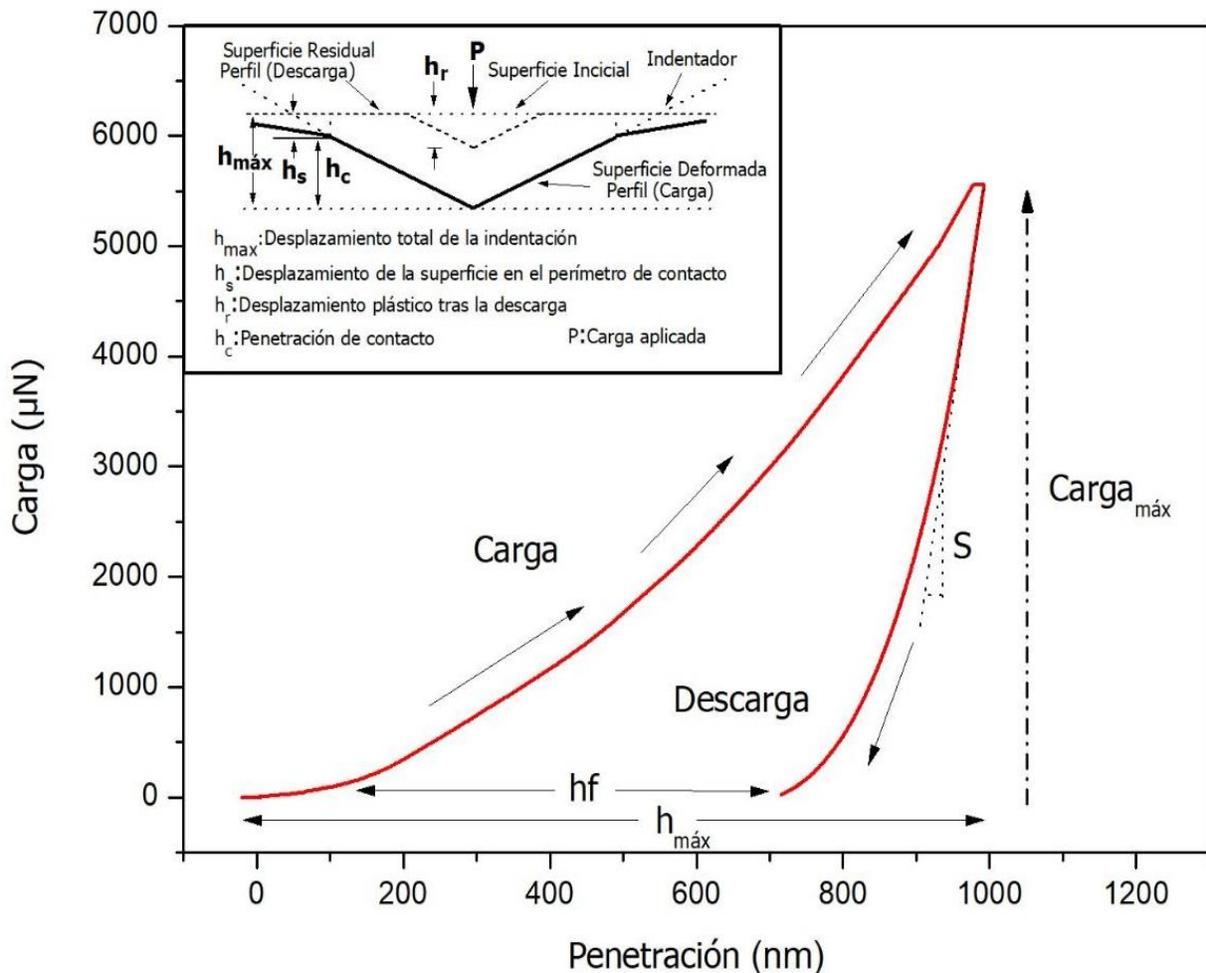


Figura 6. Curva carga-penetración y detalles de la prueba de indentación. Fuente: Elaboración propia.

#### 2.1.4. Caracterización microestructural y morfológica.

##### 2.1.4.1. Microestructura

La microestructura de un material de ingeniería es una muestra de su composición química y de los procesos a los que ha sido sometido durante su fabricación o tratamiento. Esta microestructura juega un papel fundamental, ya que es determinante en las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material, influenciando características clave como la resistencia y la dureza. Para entender y caracterizar la microestructura de un material, es necesario utilizar técnicas que permitan observar y analizar sus componentes a una escala microscópica. Este proceso de caracterización

microestructural se logra al permitir que diferentes tipos de sondas interactúen con una muestra que ha sido preparada con precisión, con el fin de obtener información detallada sobre su estructura interna.

Las sondas más comúnmente utilizadas son la luz visible, la radiación de rayos X y los haces de electrones de alta energía. Estas técnicas corresponden a tres de los métodos fundamentales de observación y análisis de materiales: la microscopía óptica, que utiliza luz visible para examinar la estructura de la muestra; la difracción de rayos X, que permite estudiar la disposición atómica y las fases cristalinas del material; y la microscopía electrónica, que utiliza un haz de electrones para alcanzar una resolución mucho mayor, proporcionando imágenes detalladas a nivel nanométrico. [42].

#### 2.1.4.2. Transformada de Fourier en Espectroscopia de Infrarrojo (FT-IR)

La espectroscopia infrarroja es una de las técnicas más importantes de la espectroscopia vibracional. Esta técnica proporciona vibraciones fundamentales características que se emplean para identificar la estructura molecular, mide las amplias bandas de sobretono y combinación de algunas de las vibraciones fundamentales (sólo los modos de frecuencia más alta) y es una técnica excelente para la cuantificación rápida y precisa [43].

El principio básico de esta técnica radica en la radiación electromagnética infrarroja, se describe como energía en movimiento senoidal continuo de los campos eléctrico y magnéticos. En la teoría cuántica, la radiación se emite desde una fuente en unidades discretas llamadas fotones las cuales poseen una cantidad de energía calculada como se muestra en la ecuación 6.

$$E_p = h\nu \quad (6)$$

Donde:

$E_p$  = Energía del fotón (erg).

$h$  = Constante de Planck (6.6256x10<sup>27</sup> erg\*seg).

$\nu$  = Frecuencia del fotón (s<sup>-1</sup>).

Los fotones de una energía específica pueden ser absorbidos (o emitidos) por una molécula dando lugar a una transferencia de energía. En los espectros de absorción, esto significa el aumento de la energía de la molécula desde el estado básico a un estado excitado [43].

Las muestras pueden examinarse a granel o en cantidades microscópicas en una amplia gama de temperaturas y estados físicos (por ejemplo, gases, líquidos, látex, polvos, películas, fibras o como capa superficial o incrustada). En la espectroscopia IR, la imagen de la fuente IR a través de una muestra se proyecta sobre un detector; la luz emitida se recoge y enfoca en un dispositivo de clasificación de longitudes de onda. En la actualidad, casi todos los instrumentos de IR medio disponibles en el mercado son espectrómetros de FT-IR, que se basan en un interferómetro [43].

#### 2.1.4.3. Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es una técnica crucial en la ciencia de materiales y la cristalografía, empleada para estudiar la estructura de los materiales a nivel atómico o molecular. Cuando los rayos X inciden sobre un cristal o una muestra policristalina, los átomos dispersan los rayos X de manera ordenada debido a la disposición periódica en la red cristalina. Este fenómeno se conoce como difracción, y los patrones resultantes contienen información detallada sobre la estructura cristalina del material [42].

Un difractómetro de rayos X consta de una fuente de rayos X, un generador de rayos X, un dispositivo de difracción, un detector y sistemas para la recolección y procesamiento de datos. El difractómetro controla la alineación del haz de rayos X, así como la posición y orientación tanto de la muestra como del detector. Los rayos X se generan al acelerar electrones hacia un objetivo de metal puro dentro de un tubo de vacío. La interacción de los electrones de alta energía con los átomos del objetivo crea agujeros en los estados fundamentales de los átomos, resultando en la emisión de rayos X [42].

#### 2.1.4.4. Morfología

La morfología de un material es la estructura y distribución física de su composición a diferentes escalas, desde un nivel macroscópico hasta la disposición atómica o molecular

a nivel microscópico. Esta influye en las propiedades mecánicas de los materiales. El estudio de la morfología permite comprender cómo las características del material, como su porosidad, textura superficial y distribución de fases, tamaños y formas [43]. Algunas de las técnicas más utilizadas para la observación de la morfología es la microscopía óptica y SEM.

#### 2.1.4.5. Entropía

La entropía en el análisis de imágenes ofrece una medida cuantitativa de la distribución de niveles de gris, proporcionando información sobre la estructura y la complejidad de una imagen digital. Los rangos de valores radican de 1 a 10, donde una imagen con alta entropía (cercana a 1) significa que los niveles de gris están distribuidos de manera uniforme o aleatoria en toda la imagen, en cambio una baja entropía (cercana a 10) indica que los niveles de gris están concentrados en algunos valores específicos, lo que implica una imagen más estructurada o con patrones repetitivos [44].

#### 2.1.4.6. Dimensión fractal

La dimensión fractal en una imagen proporciona una medida de la complejidad y la rugosidad estructural a diferentes escalas. Es útil para el análisis y la caracterización de objetos y texturas con patrones geométricos irregulares y no lineales. Los valores de esta propiedad oscilan de 2 a 3 unidades, donde 2 representa una imagen de un cuerpo liso o plano, mientras que al acercarse a la unidad 3, representa una imagen con un alto nivel de rugosidad [45].

#### 2.1.4.7. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La SEM fue desarrollado en las décadas de 1950 y 1960 para estudiar directamente la superficie de los objetos sólidos [42], [46]. La SEM es un tipo de microscopía que utiliza electrones en lugar de luz visible para formar imágenes de alta resolución de la superficie de muestras sólidas. Para generar las imágenes, un haz de electrones de alta energía se enfoca y se dirige hacia la muestra. Estos electrones interactúan con la superficie de la muestra, generando diversos tipos de señales como electrones retrodispersados (BSE), electrones secundarios (SE), y rayos X característicos. Los electrones retrodispersados

y los electrones secundarios que son emitidos desde la muestra se recogen mediante detectores especiales. Estas señales se utilizan para formar una imagen detallada de la topografía de la muestra, revelando la morfología de las muestras con resolución de hasta nanómetros, tal como se muestra en la Figura 7 [42].

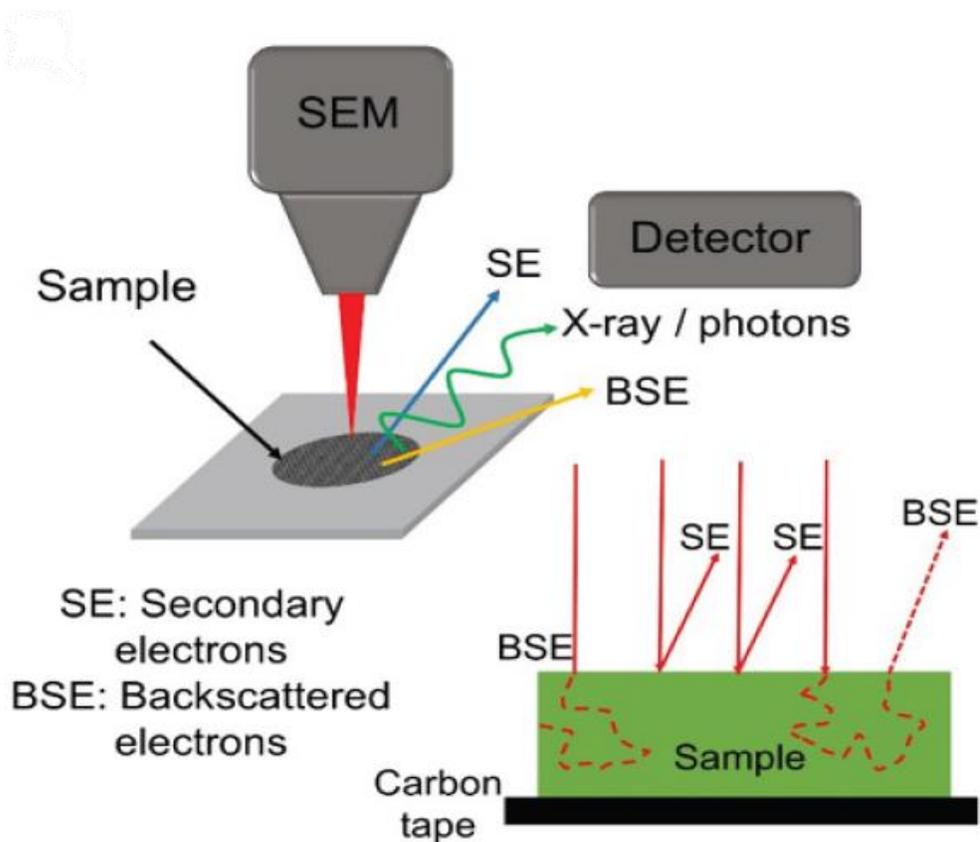


Figura 7. Principio de la SEM. Fuente: [47].

#### 2.1.4.8. Espectroscopía de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS)

El análisis EDS se realiza junto con la SEM para determinar la composición elemental de muestras sólidas. Cuando un haz de electrones incide sobre la muestra, interactúa con sus átomos, desplazando electrones internos y creando vacantes. Los electrones de capas superiores llenan estas vacantes, emitiendo rayos X característicos con energías específicas para cada elemento. El detector de EDS en el SEM detecta y cuantifica estos rayos X, cuya energía única corresponde a elementos químicos específicos. La intensidad de los picos de rayos X refleja la cantidad de cada elemento en la muestra. El

detector genera un espectro de energía que muestra estos picos, permitiendo identificar los elementos presentes y sus concentraciones relativas en la muestra [42], [47].

#### 2.1.5. Estabilización de suelos

Los especialistas en construcción, al iniciar una obra de edificación, habitualmente verifican si el suelo cumple con los estándares de calidad requeridos para su desarrollo. Durante este proceso, tienen varias opciones: realizar la obra sobre el suelo existente sin modificarlo, sustituir el suelo que no cumple con los requisitos por otro que sí los cumpla, o modificar las propiedades del suelo mediante la adición de aditivos que permitan estabilizarlo, haciendo así que sea adecuado para la construcción deseada [48].

Algunas de las características a desear en una estabilización de suelo pueden ser:

- Aumentar su compactación
- Aumentar la resistencia del suelo
- Disminuir permeabilidad, compresibilidad y absorción de agua
- Reducir asentamientos diferenciales

##### 2.1.5.1. Tipos de estabilización de suelos

Existen varios tipos o procesos empleados al momento de realizar una estabilización de suelos, estos tipos de estabilizaciones se describen a continuación:

##### 2.1.5.2. Estabilización física

Son estabilizaciones que se efectúan mediante el uso de maquinaria o equipo adecuado para la realización de este tipo de proceso. Los métodos de estabilización física pueden ser:

- Estabilización por compactación: se desarrolla mediante el uso de equipos de carga. Para suelos friccionantes se utilizan equipos de carga y vibración y equipo de amasado para suelos cohesivos.
- Estabilización por precarga: este tipo de proceso se desarrolla con el uso de la presión del agua sobre el suelo, ya que mediante este proceso se evita deformaciones y asentamientos no deseados.

- Estabilización por preconsolidación: consiste en la colocación de cargas temporales, que pueden permanecer de 6 meses a 1 año o más sobre el suelo que se busca estabilizar. Estas cargas aplicadas al suelo ocasionan asentamientos por consolidación, incrementando la resistencia y disminuyendo la relación de vacíos.
- Estabilización con drenes verticales de arena: se basa en la colocación de arenas limpias en perforaciones realizadas al suelo, consiguiendo que estas arenas actúen como filtros para extraer el agua.
- Estabilización con colchón de arena: con la finalidad de extraer el agua del suelo se coloca una capa pequeña de arena sobre suelos blandos saturados, permitiendo un suelo al cabo de un período de tiempo un suelo apto para el desarrollo de un proyecto [48].

#### 2.1.5.3. Estabilización química

La estabilización química consiste en el uso de productos elaborados como el cemento, cal, polímeros, enzimas, entre otros; que al ser mezclados con los diferentes tipos de suelo proporcionan una mejora en sus características:

- Estabilización con cemento: consiste en la colocación de cemento en polvo o en forma de lechada en el suelo, o realizando perforaciones en el mismo. Las cantidades de cemento a emplearse variaran entre el 8 % al 18 %.
- Estabilización con cal: este proceso de estabilización se desarrolla especialmente para casos en donde existe suelo arcilloso. La dosificación de cal puede variar entre el 2 % y el 8 % con respecto al peso de suelo seco. En suelos arcillosos puede presentarse estabilización por modificación (corto plazo) y por cementación (largo plazo).
- Estabilización con polímeros: esta técnica mezcla suelos principalmente arenosos con polímeros para formar una matriz que aumenta su cohesión y resistencia al corte.
- Estabilización con enzimas: se seleccionan enzimas específicas como por ejemplo, proteasas, celulasas y lipasas para descomponer compuestos orgánicos y aumentar su resistencia a la erosión y capacidad portante [48].

#### 2.1.5.4. Mecanismo de estabilización del suelo con enzimas

Las enzimas son proteínas especializadas en regular las reacciones químicas que forman parte del metabolismo de los seres vivos. También se les conoce como catalizadores biológicos, ya que pueden aumentar la velocidad de estas reacciones sin ser consumidas en el proceso.

Los aditivos enzimáticos tienen una consistencia líquida, no tóxica, no inflamable y no corrosiva fermentada a partir de extractos vegetales que modifican las propiedades geotécnicas del suelo, genera más densidades de compactación y mejora la consistencia. Las enzimas catalizan las reacciones en la arcilla y los cationes orgánicos, acelerando el proceso de reemplazo de cationes para reducir el espesor de la capa adsorbida. En las combinaciones de agua y suelo, los iones cargados (cationes) existen alrededor de las partículas de arcilla, lo que genera una capa de agua en la partícula de arcilla que se adhiere o adsorbe en las superficies exteriores de la arcilla. El agua adsorbida o la doble capa produce plasticidad en las partículas de arcilla [49].

## 2.2. Estado del arte

En relación a los suelos arcillosos, existen avances significativos a partir de la investigación, como el desarrollo de numerosos métodos de tratamiento y técnicas de estabilización. Algunos de esos métodos se emplean para mejorar el comportamiento mecánico de las arcillas. Otros implementan en las arcillas expansivas sustancias químicas mediante inyección o mezcla, para lograr una disminución en la afinidad por el agua de los minerales mediante la destrucción de los minerales arcillosos [50].

La estabilización de suelos arcillosos implementando aditivos químicos, ha sido objeto de estudio por algunos investigadores. Kushwaha S. et al. [51] demostró que la adición de un aditivo enzimático a un suelo arcilloso rojo resultó en una disminución del LL y un aumento en el LP, utilizando una copa de Casagrande. Además, se encontró que la incorporación del 4 % de enzimas provocó una reducción en la masa volumétrica seca máxima y un aumento en el contenido óptimo de humedad del suelo. Esto sugiere que, aunque las enzimas pueden modificar ciertas propiedades de los suelos, también introducen un cambio en la capacidad de compactación que debe ser considerado en

aplicaciones prácticas. Este hallazgo fue complementado por Marasteanu et al. [52] al estudiar el proceso de estabilización enzimática en dos tipos diferentes de suelos, quienes además indicaron que las características del suelo, como su porcentaje de finos y la composición química, son determinantes en el éxito de los tratamientos enzimáticos, lo que subraya la necesidad de un enfoque personalizado según el tipo de suelo a tratar.

Por otro lado, Ponni J. [53] evaluó la resistencia a la compresión no confinada en suelos tratados con enzimas, lo que resaltó en un incremento de hasta 768 % en la resistencia a compresión no confinada al someter las muestras a ciclos de humedad. Puneet A. et al. [54] de igual manera comprobó la resistencia a compresión en una arcilla negra, pero implemento un periodo de curado de 7 días, lo cual manifestó un incremento de parámetro de resistencia. Estos resultados respaldan la viabilidad de las enzimas como una alternativa eficaz para la estabilización de suelos arcillosos, especialmente en suelos que enfrentan fluctuaciones en la humedad.

Sin embargo, no todos los investigadores coinciden en que las enzimas sean siempre la mejor opción para la estabilización. AbouKhadra et al. [55] estudiaron el efecto de la estabilización enzimática, de cinco tipos diferentes de suelos, donde evaluaron sus características mecánicas usando diferentes dosificaciones enzimáticas, realizando la prueba de California Bearing Ratio (CBR) para los suelos más granulares y compresión simple no consolidada para aquellos con partículas más finas, observando que los suelos finos fueron altamente mejorados con el aditivo enzimático en comparación con las partículas gruesas. Para los suelos finos, la mejora en los valores de resistencia a compresión fue de 2.75 a 4.5 veces superior en comparación con las muestras no tratadas. Deivys Ismael [48], utilizando la misma prueba de CBR, concluyó que la aplicación de un aditivo enzimático en dos tipos diferentes de arcilla (roja y gris) aumenta aproximadamente tres veces su capacidad portante en comparación con el suelo no estabilizado. Además, realizó una comparativa entre la estabilización del suelo con cemento al 5 y 10 %, observando que para la arcilla roja, la estabilización con enzimas mostró un CBR de 9.2 %, superando los valores de CBR del suelo estabilizado con cemento al 5 y 10 % (6.86 y 6.94 %, respectivamente). Sin embargo, para la arcilla gris, el suelo estabilizado con cemento al 10 % demostró un mejor desempeño en términos de

valores de CBR, con 7.65 %, en comparación con el 4.82 % obtenido con la estabilización con enzimas. Estos resultados indican que, en algunos casos, la estabilización con enzimas no siempre es la opción más eficiente.

Otros investigadores se han adentrado a analizar la microestructura y morfología de las arcillas con diferentes estabilizadores químicos y observar que efectos tienen en algunas propiedades del suelo. Al-Mukhtar et al. [25] estudiaron los cambios en las propiedades plásticas, resistencia a la compresión no confinada y presión de expansión, en relación con la microestructura de la arcilla compactada sin tratar y tratada con cal, utilizando técnicas de DRX y SEM. Los resultados SEM muestran cambios en la morfología de las partículas de arcilla, donde la concentración de calcio es mayor en el borde de las partículas. Los resultados proporcionaron una explicación de las mejoras de las propiedades geotécnicas que surgen en el comportamiento expansivo de ellos, debido a las reacciones cal-arcillosas, principalmente una reacción puzolánica, utilizando análisis microscópicos.

Asimismo, Odeh y Al-Rkaby [19] evaluaron las propiedades mecánicas, de durabilidad y de microestructura de una arcilla (con diferentes porcentajes de arena) estabilizada con mosca de carbón y un activador alcalino de solución de hidróxido de sodio /silicato de sodio. Realizaron pruebas de resistencia a la compresión no confinada en un tiempo de curado de 28 días, pruebas de microscopía usando SEM-EDS para piezas resultantes de muestras fracturadas probadas por la máquina uniaxial. Adicionalmente se usaron para examinar la formación microestructural de la estructura del gel y la modificación en el tejido del suelo durante la estabilización. Los resultados de SEM revelaron una modificación del tejido de arcilla causada por contactos entre partículas y la unión resultante causada por la formación de gel y el endurecimiento.

También, Mengue et al. [56] analizaron la morfología y microestructura de suelos arcillosos utilizando EDS acoplado a SEM de retrodispersión. Las arcillas estudiadas estaban impregnadas de un biopolímero, identificado mediante la aparición de elementos de Fe y Al en el análisis elemental. Esto ayudó a corroborar la estabilización del suelo y la mejora de la resistencia en él. Además, se corroboró la composición mineralógica de

las arcillas mediante las intensidades de los picos obtenidos de los espectros EDS, siendo los picos más prominentes los de Al, Si, Mg y Ca.

Es importante mencionar que en diversos estudios se han empleado técnicas de FT-IR y DRX para analizar la composición elemental de las arcillas. Estos han identificado minerales como montmorillonita, illita, cuarzo, bentonita, albita, y otros menos comunes dentro del suelo. Los investigadores han identificado los espectros vibracionales de las arcillas utilizando un instrumento FT-IR en un rango de 450 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , identificando grupos funcionales de silicio en longitudes de onda de 1033, 693, 538 y 468  $\text{cm}^{-1}$ . Ellos utilizaron un difractómetro de rayos X con radiación  $\text{Cu K}\alpha$  para analizar la composición mineralógica de las muestras. Este análisis determinó los tamaños de las distancias interplanares del cuarzo e illita (4.27 y 3.34 Å, respectivamente) aplicando la fórmula de Scherrer [57-61].

También se han empleado técnicas poco comunes como la nanoindentación y el análisis de imagen para analizar algunas propiedades del suelo, como lo hizo Hou et al. [62] los cuales realizaron experimentos de nanoindentación en arcillas estabilizadas con un polímero. Se utilizó un equipo de nanoindentación instrumentado con un penetrador de diamante Berkovich. Las muestras se fijaron con resina epóxica y se lijaron hasta obtener una superficie lisa. Los resultados mostraron un cambio en los módulos de elasticidad ( $E_r$ ) y dureza ( $H$ ) de las arcillas estabilizadas, con valores de  $17.3 \pm 2.58$  GPa y  $0.62 \pm 0.25$  GPa, respectivamente. Este estudio concluyó que esta técnica es eficaz para determinar parámetros de resistencia en el suelo. Chun et al. [44] correlacionaron la organización de los poros de la estructura interna del suelo utilizando parámetros de dimensión fractal y entropía obtenidos de imágenes. La entropía se basó en la cuantificación de posibles combinaciones de píxeles porosos/sólidos en aglomerados de varios tamaños. Los resultados indicaron que la entropía de la estructura de los poros aumentó con el tamaño del agregado. Otros investigadores como Baldovino et al. [63] han evaluado el comportamiento mecánico del suelo relacionando la resistencia a la compresión no confinada y su porosidad.

A pesar del conocimiento existente en la estabilización de suelos con enzimas, es crucial señalar que las investigaciones se han centrado principalmente en el desarrollo de vías

terrestres y además no presentan un análisis con el conjunto de pruebas mencionadas anteriormente. Por lo tanto, al analizar los suelos arcillosos estabilizados para cimentaciones superficiales, se aborda un enfoque diferente, ya que se estudiará la capacidad portante del suelo utilizando una propuesta de cimentación comúnmente empleada en la industria de la ingeniería civil (zapata aislada). Además, esta investigación contribuirá al avance del conocimiento sobre las propiedades mecánicas, el proceso de estabilización, el comportamiento de la microestructura y morfología de estos suelos tratados con enzimas estabilizadoras, utilizando concentraciones del 2, 4 y 8 % de este aditivo en relación con el agua necesaria para obtener el contenido de humedad óptimo del suelo. Se evaluará el desempeño de la estabilización con dos períodos de curado (15 y 30 días) para comprender el efecto del aditivo a lo largo del tiempo.

Es importante destacar que se implementarán técnicas poco comunes en el ámbito de la geotecnia, como la nanoindentación y la masa volumétrica compactada, las cuales se complementarán con una metodología de análisis de imágenes para extraer propiedades como la entropía y la dimensión fractal. Estos métodos son pocos utilizados como complemento en el análisis de pruebas mecánicas y en la comprensión del mecanismo de estabilización del suelo.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Introducción

Este proyecto de investigación se desarrolló siguiendo una metodología estructurada en seis etapas. La primera etapa consistió en la preparación e identificación de las muestras extraídas. En la segunda etapa, se determinaron algunas propiedades índices del suelo, como la granulometría. La tercera etapa incluyó la aplicación de dos técnicas para evaluar las propiedades mecánicas del suelo: la resistencia a la compresión no confinada y la nanoindentación. En la cuarta etapa, se realizó un análisis microestructural mediante espectroscopía FT-IR y DRX. La quinta etapa se enfocó en el análisis morfológico de las arcillas, utilizando técnicas de análisis de imagen y SEM. Finalmente, en la sexta etapa, se calculó la capacidad portante del suelo siguiendo las normas NTC-DDC [11].

En la Figura 8 se muestra un diagrama de flujo de las actividades que componen la metodología aplicada

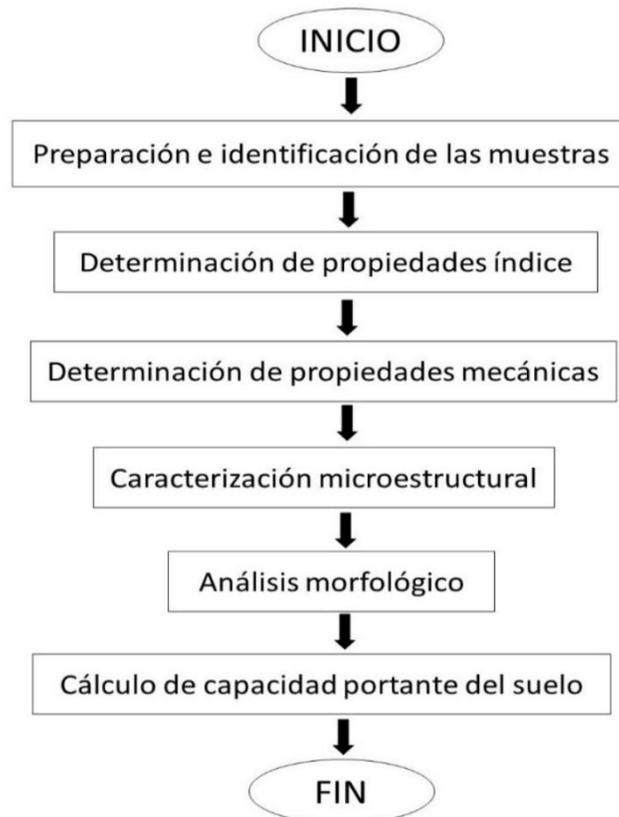


Figura 8. Diagrama de flujo de actividades a realizar. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Materiales

- Solución enzimática a base de lipasas, quitinasas, proteasas, con apariencia café oscura, pH de 4-5.5. Su olor se compara con el de la melaza de caña y su consistencia es totalmente líquida. Es un producto no inflamable y no tóxico.
- Muestras inalteradas de un suelo arcilloso de color café oscuro, con una consistencia pastosa y plástica debido a la presencia de humedad. Su olor es suave y natural, resultado de la descomposición de materia orgánica, minerales y microorganismos presentes en la arcilla. También se observan restos de materia orgánica en descomposición, como raíces y hojas. En su estado seco, el suelo adquiere un color café claro y muestra una notable contracción y agrietamiento debido a la deshidratación. La ubicación del suelo se encuentra en un predio próximo a ser urbanizado por una inmobiliaria en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Este predio se identifica como Stanza Granada y se localiza en la zona noroeste de la ciudad. En la Figura 9 se muestra la localización de la extracción del suelo.

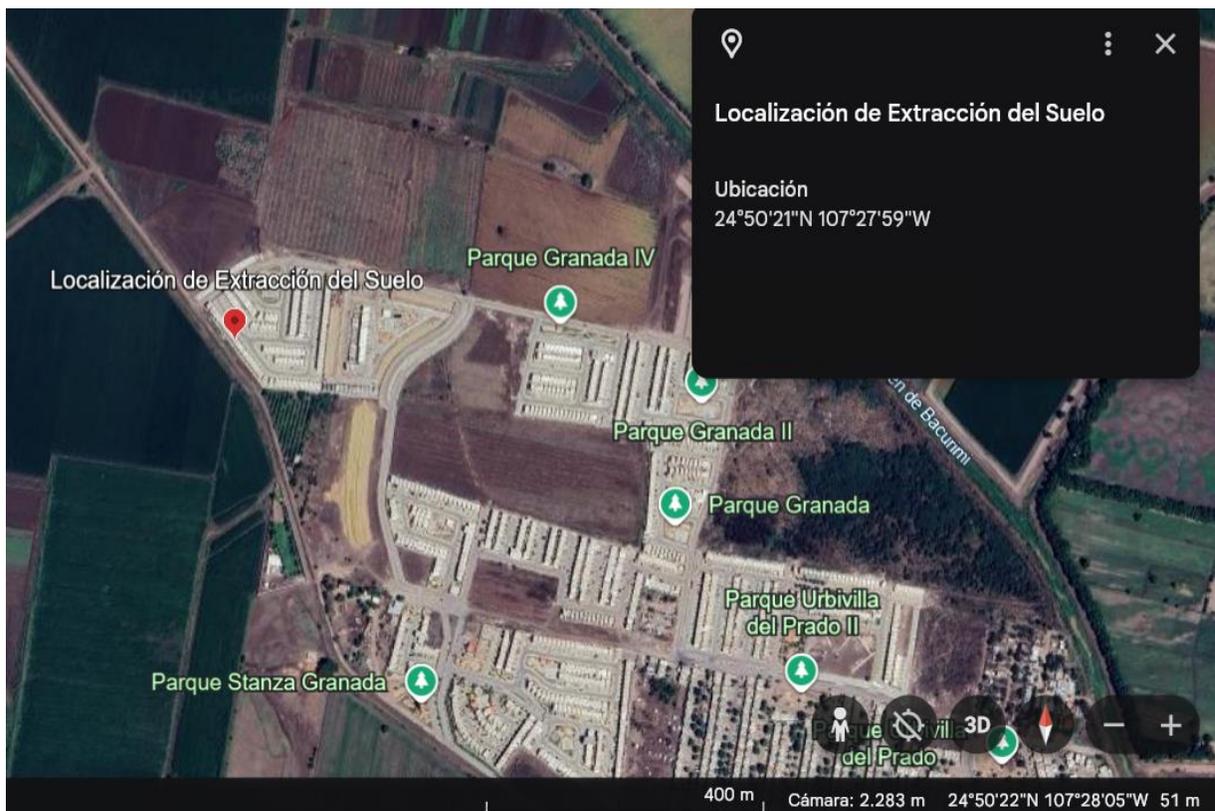


Figura 9. Localización de la extracción del suelo. Fuente: [96]

- Agua potable transparente, sin olor, sin turbidez ni presencia de sedimentos, con una temperatura promedio de 4 °C.

Se realizaron pruebas para evaluar las propiedades índices y mecánicas de las arcillas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Culiacán, así como en el Laboratorio de Ingenium Ingenieros Consultores. Por otro lado, para analizar la microestructura de los suelos, se realizaron pruebas en el Centro de Nanociencia y Nanotecnología del Instituto Politécnico Nacional.

### **3.3. Métodos**

#### 3.3.1. Preparación e identificación de las muestras

##### 3.3.1.1. Extracción del suelo

Se llevó a cabo la extracción del material mediante la apertura de un pozo a cielo abierto, para lo cual se solicitó el apoyo de los responsables de la obra y maquinaria pesada para excavar a una profundidad de 2 metros. Se creó una abertura suficiente para maniobrar y extraer las muestras, se realizó una abertura en la pared del perfil del suelo, obteniendo aproximadamente 80 kg de material alterado. Este material se selló en cubetas para evitar la contaminación con otros materiales. En la Figura 9 se muestra la localización de la extracción del suelo.

##### 3.3.1.2. Secado, disgregado y cuarteo de las muestras de arcillas.

El secado del suelo se llevó a cabo colocando el material húmedo en charolas limpias y lisas, con capas pequeñas del material utilizando un horno de secado a  $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  durante 24 h.

Para el disgregado se separaron los aglomerados de las partículas de arcilla, con un mazo de goma aplicando la fuerza necesaria para no romper las partículas más duras, se pasaron por la malla de 425  $\mu\text{m}$  (No. 4) y se mantuvieron en recipientes sellados para no contaminar con otros materiales, posteriormente se realizó la reducción de las muestras al tamaño adecuado para cada una de las pruebas mediante la técnica de cuarteo, el material se colocó en una superficie grande y limpia, con una pala se vertió el material hasta formar un cono con un espesor y un diámetro uniforme, posterior a esto

se aplano el material y se formó cuadrantes iguales con una regla, finalmente se colocaron los cuadrantes opuestos en charolas limpias, de acuerdo con la norma ASTM C-702 [64].

### 3.3.1.3. Labrado e identificación de las muestras

Para la estabilización de la arcilla se elaboraron muestras alteradas, a las cuales se le añadieron 2, 4 y 8 % de enzima respectivamente, en relación a la cantidad de agua necesaria para lograr el contenido de humedad óptimo (33 %). Los materiales se mezclaron y compactaron en moldes cilíndricos hasta alcanzar el 95 % de grado de compactación respecto a la masa volumétrica seca máxima. Después, se emplearon y curaron durante 15 y 30 días a 40 °C en una incubadora.

Para las pruebas de masa volumétrica y microestructurales las muestras de suelo se molieron utilizando un molino planetario de alta energía (Pulverisette 7, Fritsch, Alemania) durante 4 ciclos de trabajo (duración del ciclo 15 min). En la Tabla 2 se indica la nomenclatura para la identificación de las muestras.

Tabla 2. Nomenclatura de muestras.

<b>Suelo</b>	<b>Curado (días)</b>	<b>Nomenclatura</b>
<b>Remoldeado sin aditivo</b>	0	C
<b>Remoldeado con 2 % de aditivo</b>	15	E2-15
<b>Remoldeado con 4 % de aditivo</b>	15	E4-15
<b>Remoldeado con 8 % de aditivo</b>	15	E8-15
<b>Remoldeado con 2 % de aditivo</b>	30	E2-30
<b>Remoldeado con 4 % de aditivo</b>	30	E4-30
<b>Remoldeado con 8 % de aditivo</b>	30	E8-30

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2. Determinación de propiedades índice del suelo

#### 3.3.2.1. Granulometría

Se emplearon 500 g de material arcilloso que se tamizó a través de un juego de mallas desde 50 mm hasta 75  $\mu$ m (2 in. hasta la No. 200). El material se distribuyó

uniformemente en cada malla mediante agitación manual. Posteriormente, se recolectó el material retenido por la malla de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) y se suspendió en un recipiente con agua, agitándolo durante un minuto para asegurar la completa disolución de las partículas más finas en el agua. Luego, se filtró nuevamente a través de la malla de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) y se lavó hasta que el agua se volvió transparente y limpia. El material retenido en esta malla se colocó en una charola lisa y se secó para luego pesarlo, determinando así la distribución del tamaño de las partículas, siguiendo el procedimiento estipulado en la norma ASTM D 422-63 [30].

La distribución del tamaño de las partículas del suelo que pasaron la malla de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200). Se utilizó 5 g de la arcilla la cual se sumergió en un contenedor con agua y posterior a esto se clasificó con un equipo de difracción láser (Mastersizer 3000, Malvern Panalytical Ltd, Reino Unido) en modo de dispersión húmeda, este equipo se basa en analizar el número de partículas de cada muestra para cada tamaño [31].

#### 3.3.2.2. Determinación del contenido de humedad

Se determinó el contenido de humedad de los suelos a estudiar como complemento de las otras pruebas realizadas, el procedimiento consistió en pesar inicialmente charolas numeradas, secas y limpias. Luego, se pesó la charola con el suelo en su estado húmedo correspondiente. A continuación, la charola con el suelo se colocó en un horno de secado a una temperatura constante de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 h. Después de este tiempo, se volvió a pesar la charola con el suelo ya seco. Todos los cálculos se llevaron a cabo conforme a la norma ASTM D2216-19 [40].

#### 3.3.2.3. Masa volumétrica seca máxima y el contenido de humedad óptimo

Se realizó la prueba de compactación utilizando el método "A", empleando un molde cilíndrico de 4 pulgadas (101.6 mm) de diámetro con su extensión y el correspondiente pisón. Se optó por este método dado que el porcentaje de material retenido en la malla de 425  $\mu\text{m}$  (No. 4) era inferior al 20 %, cumpliendo con el mínimo de 4 puntos de control (especímenes) establecido por la norma ASTM D698 [33].

El suelo se mezcló con un contenido de agua cercano al óptimo para moldeo y se dispuso en el molde en tres capas, compactándolo cada vez con 25 golpes del pisón, desde una

altura de caída de 12 pulgadas (304.8 mm). Este proceso se repitió para obtener diferentes contenidos de agua, necesarios para establecer la relación entre el peso de la masa seca y el contenido de agua del suelo. Los datos obtenidos se representaron gráficamente para formar la curva de compactación, que exhibe una relación curvilínea característica. A partir de la curva de compactación, se determinaron los valores óptimos de contenido de agua y la masa volumétrica seca máxima del suelo.

#### 3.3.2.4. Masa volumétrica suelta y compactada

Se determinó la masa volumétrica suelta y compactada, así como la relación entre ellas (coeficiente de Hausner), de los suelos bajo estudio utilizando una probeta graduada de 10 ml de capacidad. El procedimiento comenzó llenando el cilindro con las muestras en estado suelto y dejándolo caer desde una altura de 10 cm sobre el recipiente. Se registró el peso del suelo y se calculó la masa volumétrica suelta considerando el volumen del recipiente. Posteriormente, se compactó el suelo golpeando la probeta sobre una superficie plana durante 5 minutos, alcanzando un total de 500 golpes. Se midió el volumen ocupado por el suelo dentro del recipiente y se procedió a calcular la masa volumétrica compactada. Es importante mencionar que todas las pruebas se realizaron siguiendo los procedimientos estipulados en la norma ASTM D781 [34].

#### 3.3.2.5. Límites de Consistencia

Se realizaron pruebas de límites de Atterberg para determinar LL, LP e IP de las arcillas, tanto para el suelo C como los estabilizados con dosificaciones de enzima. Estas pruebas se realizaron conforme a la norma ASTM D4318 [37].

Los equipos y herramientas utilizados incluyeron:

- Copa de Casagrande eléctrica.
- Ranurador.
- Cápsula de porcelana.
- Espátula plana.
- Báscula con precisión de 0.001 dígitos.
- Horno de secado.
- Capsulas de aluminio.

- Bloque de cristal.
- Probeta 100 ml.

Para el procedimiento de la prueba, se separaron 300 g de arcilla para cada muestra y se tamizaron a través de una malla de 425  $\mu\text{m}$  (Nº 40). Para determinar el LL, la muestra se colocó en una cápsula de porcelana y se hidrató durante 24 h. Posteriormente, se extendió la arcilla húmeda en la copa Casagrande, se abrió una ranura en el centro y se giró la manivela a dos golpes por segundo. Se registró el número de golpes necesarios para cerrar la ranura a una longitud de 13 mm, junto con el contenido de humedad presente en el suelo. Este proceso se repitió con diferentes niveles de humedad para obtener al menos tres puntos representativos, que se utilizaron para trazar una curva de humedad contra el número de golpes.

Para determinar el LP, se tomó una muestra del tamaño de la palma de la mano, se moldeó y mezcló hasta que la arcilla alcanzó una consistencia adecuada para formar un hilo de aproximadamente 3.2 mm de diámetro. Se obtuvo un mínimo de 6 g de muestra y se determinó el contenido de agua en al menos dos muestras de suelo. Finalmente, para calcular el IP se utilizó la ecuación 7.

$$IP = LL - LP \quad (7)$$

Donde:

$IP$  = Índice de plasticidad (adimensional).

$LL$  = Límite líquido (%).

$LP$  = Límite plástico (%).

### 3.3.3. Determinación de propiedades mecánicas

#### 3.3.3.1. Resistencia a la compresión no confinada

La determinación de la resistencia a la compresión no confinada de las muestras se realizó por triplicado siguiendo la norma ASTM D2166 [40]. Los ensayos se llevaron a cabo en un marco de carga axial sin confinamiento lateral. Las muestras cilíndricas fueron pesadas con una báscula de precisión de 0.01 kg y se midió su diámetro y altura utilizando un vernier. Posteriormente, se montaron en la cámara triaxial sin aplicar carga

lateral, asegurándose de centrarlas correctamente dentro del marco de carga. Se ajustó el micrómetro a cero para medir la deformación de las muestras.

El proceso de ensayo comenzó incrementando la carga gradualmente, manteniendo una tasa de deformación aproximada del 1 % por minuto. Este procedimiento continuó hasta que las muestras alcanzaron su punto de fallo o, en su defecto, una deformación del 15 % respecto a su altura inicial. Durante el ensayo, se registraron las deformaciones junto con los incrementos de carga aplicados. También se determinó el contenido de humedad presente en las muestras. Para calcular la cohesión del suelo, se utilizó la teoría de Mohr-Coulomb [65] aplicando la ecuación 8.

$$C = \frac{q_u}{2} \quad (8)$$

Donde:

$q_u$  = Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>).

C = Cohesión (kg/cm<sup>2</sup>).

### 3.3.3.2. Nanoindentación

Utilizando un sistema de indentación instrumentado (Hysitron TS 77 Nanoindenter, Bruker) equipado con un indentador de diamante Berkovich y el método de Oliver y Pharr [41], se analizaron las curvas de indentación para obtener los valores de módulo elástico (Er) y dureza (H) del suelo.

Bathija [66] presentó la metodología de secado para estudiar la respuesta de nanoindentación de las arcillas, por lo que las muestras se secaron en un horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C. Sin embargo es casi imposible utilizar esta técnica al aislar una partícula de suelo fino ( $\leq 75$   $\mu$ m), lo adecuado es confinar la muestra permitiendo la deformación unidireccional [67].

La muestra fue sellada en un molde con resina epóxica y para reducir su topografía rugosa [62], la resina se pulió con una pulidora y un juego de lijas (No. 200, 320, 480, 600, 800, 1200 y 2000) hasta alcanzar la superficie de la muestra sin dañarla. El módulo elástico se midió con una carga máxima de 5000  $\mu$ N y 3 repeticiones para cada estructura

de arcilla. Se ensayaron muestras del suelo C y las que presentaron mejor rendimiento en las pruebas de compresión no confinada.

### 3.3.4. Caracterización microestructural

#### 3.3.4.1. Transformada de Fourier en Espectroscopia de Infrarrojo (FT-IR)

Los espectros FT-IR de las muestras de enzimas y suelos con y sin tratamiento enzimático se obtuvieron con un espectrómetro (FT-IR 6200, JASCO) para los intervalos de longitudes de onda comprendidos entre 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$ . Los espectros se adquirieron con acumulación de 32 barridos utilizando un detector TGS operado a resoluciones de 4  $\text{cm}^{-1}$ . El procesamiento de los datos crudos, se llevó a cabo con el programa OriginPro 8.

#### 3.3.4.2. Difracción de Rayos X (DRX)

La composición mineral de las arcillas se investigó utilizando un difractómetro de rayos X (Empyrean 2, Malvern Panalytical, Reino Unido) con radiación Cu-Ka ( $\lambda=0.1540$  nm),  $2\theta$  de 5–60° a 0.01 s/paso, 20 s de paso de tiempo. Para analizar las distancias interplanares de los minerales se utilizó la ecuación 9 de Scherrer.

$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{(\beta \cos\theta)} \quad (9)$$

Donde:

$D_{hkl}$  = Distancia interplanar (nm).

$K$  = Factor de corrección de forma (0.9) (adimensional).

$\lambda$  = Longitud de onda de la radiación (nm).

$\beta$  = Anchura del pico a media intensidad máxima (rad).

$\theta$  = Ángulo de Bragg correspondiente al plano cristalino principal (rad).

La variable  $\beta$  se calculó con la herramienta Integrate Multiple Peaks del programa OriginPro 8.

### 3.3.5. Análisis morfológico

### 3.3.5.1. Análisis de imagen

Las imágenes del suelo se capturaron con un microscopio óptico (Motic, PSM-1000, China) adaptado con una cámara digital (Moticam 1080, China) utilizando un objetivo de 60 aumentos. Para la evaluación de la entropía y la dimensión fractal, se utilizó el programa ImageJ con la herramienta MapFractal y Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) con un total de 10 imágenes para cada grupo de suelo.

### 3.3.5.2. Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopía de Dispersión de Energía de Rayos X (SEM-EDS)

La morfología de las arcillas con y sin tratamiento enzimático se observó mediante un microscopio electrónico de barrido (SU3500, Hitachi Co, Matsuda, Japón) . Las muestras se montaron en soportes de aluminio y se recubrieron de oro con un ionizador. Estas se observaron a una tensión de aceleración de 5 kV, a 100  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  y 100 nm como distancias de trabajo y distintos aumentos de 200X, 500X, 10,000X, 20,000X, 50,000X, utilizando un detector de electrones secundarios. El análisis EDS se realizó conjuntamente con la técnica SEM, por lo que las muestras se prepararon con las mismas características. La microscopía electrónica de barrido y la asignación elemental se analizaron para el suelo C, E2 y E8.

### 3.3.6 Cálculo de capacidad portante del suelo

El diseño de cualquier cimentación superficial debe siempre tener en cuenta el estado límite de falla. Este límite representa la relación entre la suma de las cargas verticales aplicadas a la cimentación, inherentes a la estructura, y la capacidad de carga admisible del suelo sobre el que se desplanta. La capacidad de carga admisible del suelo se determinó mediante el cálculo basado en la cohesión de los suelos, utilizando la teoría de Terzaghi para suelos cohesivos [7]. Las Ecuaciones 10 y 11 se utilizan para calcular la capacidad de carga admisible.

$$q_a = c \cdot N_c \cdot Fr + \sigma_v \quad (10)$$

$$N_c = 5.14 \left[ 1 + \left( \frac{0.25Df}{B} \right) + \left( \frac{0.25B}{L} \right) \right] \quad (11)$$

Donde:

$q_a$  = Capacidad de carga admisible del suelo (kg/m<sup>2</sup>).

$C$  = Cohesión del suelo (kg/m<sup>2</sup>).

$N_c$  = Factor de capacidad de carga (adimensional).

$F_r$  = Factor de resistencia a partir de estimaciones analíticas con un valor de 0.35 para zapatas ante cualquier combinación de cargas (adimensional).

$\sigma_v$  = Presión vertical efectiva a la profundidad de desplante (kg/m<sup>2</sup>).

$D_f$  = Profundidad de desplante (m).

$B$  = Ancho de la cimentación (m).

$L$  = Largo de la cimentación (m).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización del suelo control

El suelo presentó una distribución mal graduada de partículas finas según la clasificación SUCS. Mediante el método de tamizado el 100 % del material pasó por los tamices de 425  $\mu\text{m}$  (No. 4) y 75  $\mu\text{m}$  (No. 200), por otro lado en el análisis con el equipo Mastersizer 3000 mostró que el 99 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 1  $\mu\text{m}$  y el 1 % restante oscila en el tamaño de 2  $\mu\text{m}$ , también se identificó que el tamaño predominante en esta distribución fue de 57.9 nm con un 5.68 % del volumen de la muestra analizada (Figura 10).

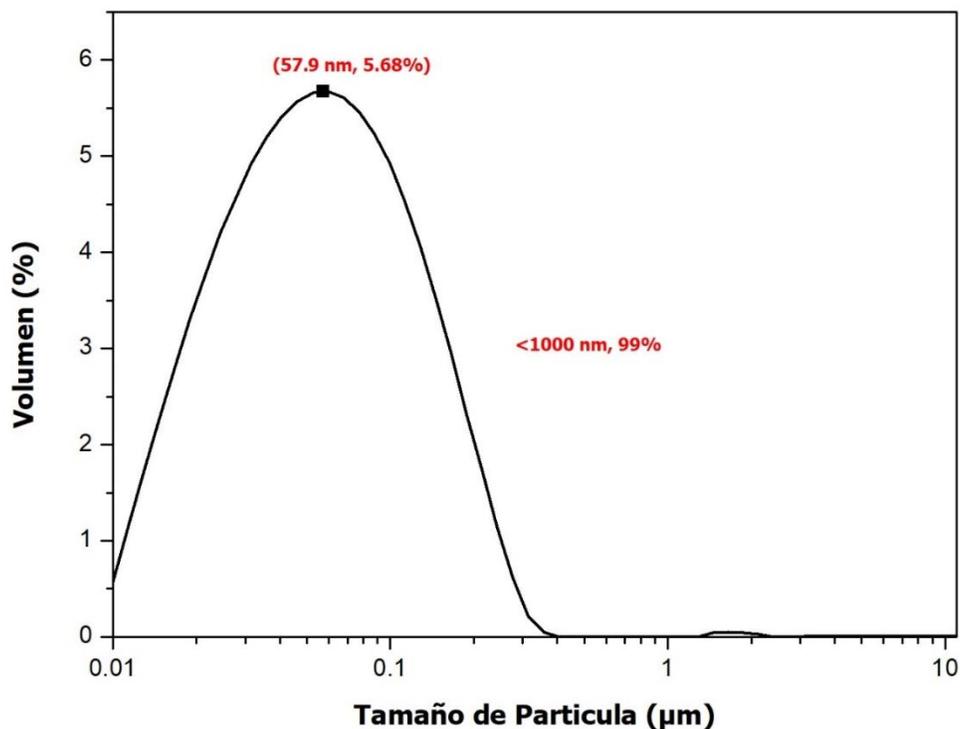


Figura 10. Histograma de la distribución de las partículas. Fuente: Elaboración propia.

En la determinación del contenido óptimo de humedad par el suelo C, se identificaron 5 puntos significativos para trazar la curva de compactación (Figura 11). Se observó que se alcanzaba la masa volumétrica seca máxima de 1.34  $\text{g}/\text{cm}^3$  con un contenido de humedad del 33 %. La masa volumétrica de compactación ( $Y_m$ ) resultante de la masa volumétrica seca máxima más el contenido de humedad óptimo resultó de 1.78  $\text{g}/\text{cm}^3$  para un 100 % de compactación. Sin embargo, dado el desafío de replicar la

compactación de laboratorio en condiciones de campo, se decidió utilizar el valor obtenido para un 95 % de compactación, estableciendo así un parámetro de compactación de 1.69 g/cm<sup>3</sup> para las demás pruebas.

Esta decisión se basa en la necesidad de obtener resultados que reflejen condiciones realistas y prácticas, considerando las variaciones inherentes entre la compactación de laboratorio y la de campo.

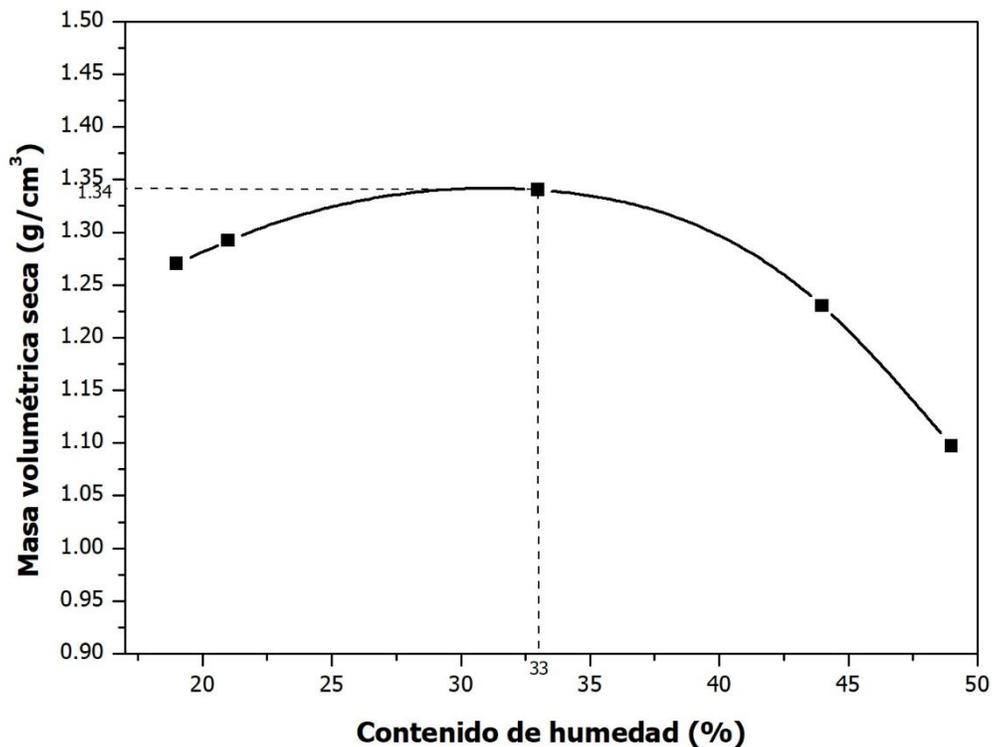


Figura 11. Curva de compactación del suelo C. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3 se engloban algunas propiedades índices del suelo C.

Tabla 3. Propiedades índices del suelo C.

Porcentaje de suelo que pasa por la malla de 75 µm (No. 200) (%)	99
Contenido de humedad óptima (%)	33
Masa volumétrica de compactación (g/cm <sup>3</sup> )	1.78
Masa volumétrica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1.34
Grado de compactación (%)	95

Fuente: Elaboración propia

## 4.2. Resultados de masa volumétrica suelta y compactada

En la Tabla 4 se muestran los valores de las masas volumétricas sueltas y compactadas para los suelos con y sin estabilización. Las muestras E8-30 exhibieron la masa volumétrica suelta más alta en ambos períodos de curado (15 y 30 días), seguidas por las muestras E2-30 y E4-30, respectivamente. En términos generales, se observa que las muestras curadas durante 30 días tienden a presentar una masa volumétrica suelta ligeramente superior a aquellas curadas durante 15 días. Por otro lado, las muestras E8-15 y E8-30 muestran la masa volumétrica compactada más elevada, seguidas por las muestras E4-15 y E4-30, respectivamente. Nuevamente, se aprecia que las muestras curadas durante 30 días tienden a tener una masa volumétrica compactada ligeramente mayor que las curadas durante 15 días.

El coeficiente de Hausner es una medida de compactación de los polvos, donde un valor más alto indica una menor compactación del polvo [68]. En este sentido, las muestras E8-15 y E8-30 muestran el Hausner más alto, lo que sugiere una mayor fluidez o compactación en comparación con las demás muestras. Este fenómeno puede atribuirse a la adición de materia orgánica presente en el suelo, ya que esta posee un grado de compactación más elevada que los subgranos de minerales arcillosos [69]. Las muestras de suelo tratadas con enzima mostraron una mejora superior al 6 % en comparación con la muestra C. Al analizar el parámetro de Hausner, se puede vincular con la definición de compactibilidad, observándose que la adición de un aditivo enzimático incrementó la compactibilidad del suelo. Es evidente que a medida que aumentó la dosificación de la enzima, también lo hizo la compactibilidad de las arcillas. Este hallazgo resulta beneficioso para el estudio ya que al incrementar la compactibilidad, también se mejora la resistencia del suelo. En un estudio similar, J. Pooni et al. [53] añadió un aditivo bioenzimático en bajas concentraciones, lo que resultó en un aumento del 3 % en la masa volumétrica seca máxima. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la presente investigación, se observa un incremento del doble en la masa compactada. No obstante, cabe señalar que las técnicas utilizadas para determinar las masas volumétricas fueron distintas, lo que podría haber influido en las diferencias observadas debido a los parámetros empleados.

Tabla 4. Valores para la masa volumétrica suelta ( $\rho_s$ ) y compactada ( $\rho_c$ ) para los suelos con y sin estabilizar.

Suelo	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	Hausner (adimensional)
<b>C</b>	311.5 ± 5.6	635.91 ± 11.3	2.04 ± 0.06
<b>E2-15</b>	309 ± 8.2	698.28 ± 8.7 <sup>a</sup>	2.26 ± 0.05 <sup>a</sup>
<b>E4-15</b>	305.75 ± 11.5	727.87 ± 18.5 <sup>b,c</sup>	2.38 ± 0.05 <sup>b</sup>
<b>E8-15</b>	302.75 ± 6.6	733.91 ± 11.3 <sup>c</sup>	2.42 ± 0.03 <sup>b</sup>
<b>E2-30</b>	327.25 ± 6.7 <sup>a</sup>	707.72 ± 21 <sup>a</sup>	2.16 ± 0.02 <sup>a</sup>
<b>E4-30</b>	309.25 ± 2.6	715.10 ± 10.5 <sup>b</sup>	2.31 ± 0.03 <sup>c</sup>
<b>E8-30</b>	343.5 ± 15.6 <sup>b</sup>	763.04 ± 15.1 <sup>a</sup>	2.22 ± 0.10 <sup>a,c</sup>

Nota: los valores se expresaron como media ± desviación estándar. Misma letra en cada columna indican diferencias estadísticamente no significativas en  $p > 0.05$ .

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Resultados de los límites de consistencia

Los resultados indican mejoras en los límites de consistencia del suelo tratado. La Tabla 5 presenta los valores obtenidos en los LL, LP e IP para los suelos con y sin tratamiento enzimático. En cuanto a los LL se observó que los suelos E2-15 y E4-15 presentan cambios respecto al suelo sin tratar, con una disminución del 9 y 8 % respectivamente, lo que indica que hay una afectación directa por el método de estabilización. Para los LP, de las muestras no presentaron cambios entre ellas, por lo que al añadir las enzimas a la matriz de arcilla mantiene un rango constante de humedad, en el cual el suelo debe alcanzar para deformarse sin agrietarse en respuesta a una tensión aplicada [70-71]. Al inspeccionar los resultados del IP obtenidos de la diferencia resultante entre el LL y LP, la muestra E2-15 y E2-30 presentaron una reducción del 17 % en comparación del suelo C, las muestras E4-15 y E4-30 presentaron una reducción del 13 % y 9 % respectivamente, sin embargo este límite disminuyó 9 y 5 % en los suelos E8-15 y E8-30, lo que significa considerables mejoras en la plasticidad del material. [7], [72].

Tabla 5. Límites de consistencia de los suelos y su correspondiente clasificación SUCS.

Suelo	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS
<b>C</b>	92.57 ± 2.78	40.48 ± 1.47	52.08 ± 1.43	MH u OH
<b>E2-15</b>	84.21 ± 3.99 <sup>a</sup>	40.95 ± 1.22	43.25 ± 2.81 <sup>a</sup>	MH u OH
<b>E4-15</b>	85.32 ± 0.34 <sup>a</sup>	39.88 ± 0.35	45.44 ± 0.68 <sup>a</sup>	MH u OH
<b>E8-15</b>	88.41 ± 1.01	41.38 ± 1.73	47.03 ± 2.73	MH u OH
<b>E2-30</b>	87.26 ± 1.14	40.88 ± 1.13	43.13 ± 0.94 <sup>a</sup>	MH u OH
<b>E4-30</b>	87.16 ± 1.04	39.79 ± 0.89	47.36 ± 1.39	MH u OH
<b>E8-30</b>	87.95 ± 0.6	38.63 ± 1.44	49.32 ± 1.63 <sup>b</sup>	MH u OH

Nota: los valores se expresaron como media ± desviación estándar. Misma letra en cada columna indican diferencias estadísticamente no significativas en  $p > 0.05$ .

Fuente: Elaboración propia.

Se clasificó cada una de las muestras mediante la clasificación SUCS. En la Figura 12 se muestra la localización exacta dentro de la carta de plasticidad de Casagrande para cada suelo según la clasificación SUCS.

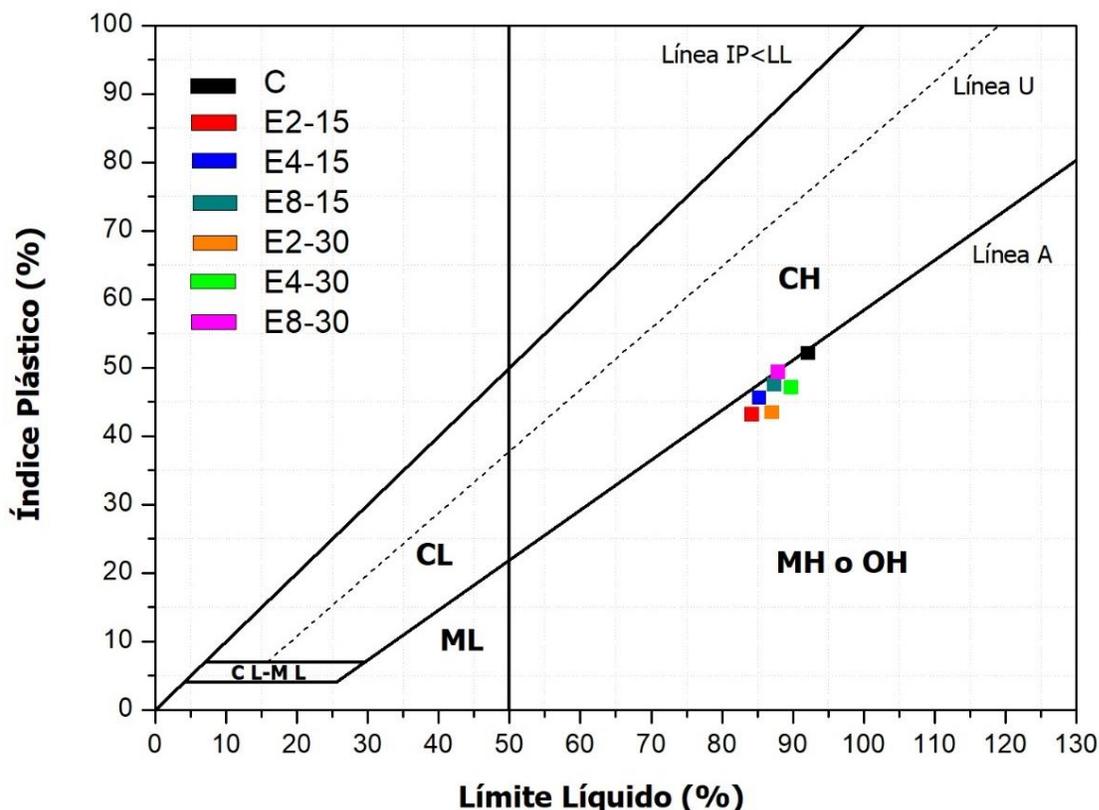


Figura 12. Carta de plasticidad utilizada para la identificación de los suelos.

Fuente: Elaboración propia

La ubicación de los suelos rebasó la línea B dentro de la carta de plasticidad lo que indica que los suelos tienen una alta plasticidad [73], además estos pertenecen a la zona inferior de la línea A, clasificada como limos inorgánicos, limos y arcillas orgánicas [72]. Los puntos referentes a las muestras C, E4-15, E8-15 y E8-30 se encuentran muy cercanos a la línea A frontera el cual se acerca a las arcillas de alta plasticidad, mientras que E2-15, E2-30 y E4-30 se encuentran mejor definidas como limos o arcillas orgánicas.

#### **4.4. Resultados de la resistencia a compresión no confinada**

En la Figura 13 se muestran los valores de resistencia máxima promedio en la prueba de resistencia a la compresión no confinada de las muestras arcillosas con diferentes concentraciones de enzimas. El suelo C presentó un esfuerzo máximo promedio de  $1.37 \pm 0.17$  kg/cm<sup>2</sup> mientras que la cohesión resultó con un valor de  $0.69 \pm 0.09$  kg/cm<sup>2</sup> (Tabla 6), la mejora del suelo es clara al aplicar un porcentaje del aditivo enzimático, para las muestras E2-15 y E2-30 se obtuvo resistencias de  $2.85 \pm 0.03$  kg/cm<sup>2</sup> y  $2.43 \pm 0.14$  kg/cm<sup>2</sup> con una cohesión de  $1.42 \pm 0.01$  kg/cm<sup>2</sup> y  $1.22 \pm 0.07$  kg/cm<sup>2</sup> siendo mejoras del 108 % y 77 % en comparación de la muestra control. Las mezclas E4-15 y E4-30 también se puede apreciar un incremento significativo en la resistencia a compresión respecto a la arcilla sin estabilización, con una resistencia máxima promedio de  $2.12 \pm 0.40$  kg/cm<sup>2</sup> y  $2.15 \pm 0.24$  kg/cm<sup>2</sup> y valores de cohesión del orden de  $1.06 \pm 0.2$  kg/cm<sup>2</sup> y  $1.07 \pm 0.12$  kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, obteniendo una mejora del 55 % y 57 %. Por otro lado para las muestras E8-15 y E8-30, no se presentaron cambios significativos en contraste del suelo C, los valores de esfuerzo fueron de  $1.63 \pm 0.12$  kg/cm<sup>2</sup> y  $1.95 \pm 0.24$  kg/cm<sup>2</sup> respectivamente mientras que la cohesión de  $0.82 \pm 0.06$  kg/cm<sup>2</sup> y  $0.97 \pm 0.12$  kg/cm<sup>2</sup>.

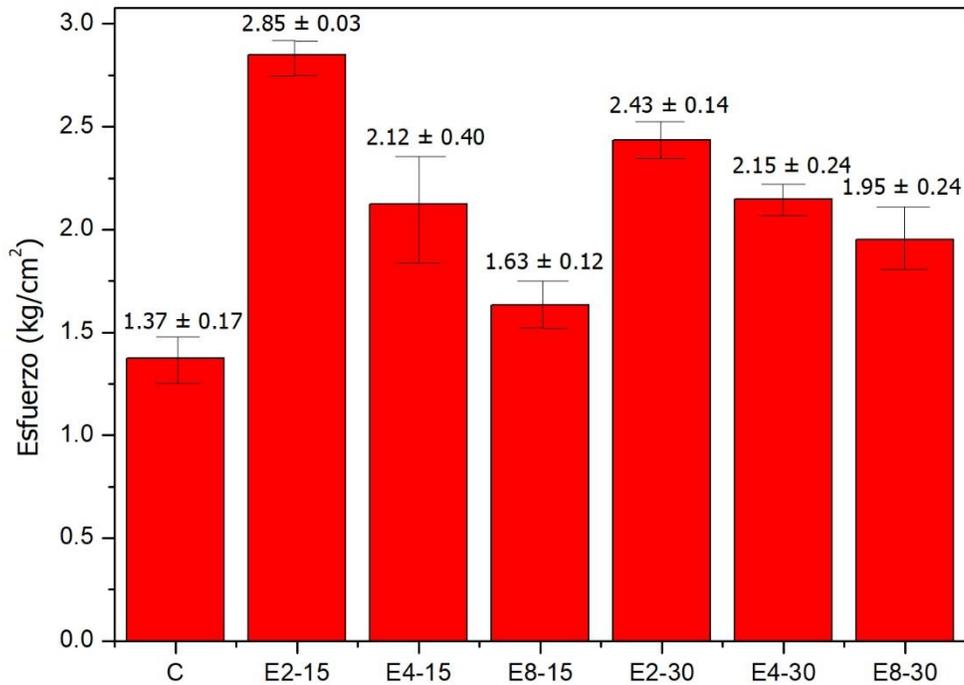


Figura 13. Esfuerzos máximos promedios para las arcillas. Fuente: Elaboración propia

Se puede analizar que al aumentar gradualmente la dosificación de enzima respecto al contenido óptimo de humedad, la resistencia a compresión del suelo disminuye, además se puede identificar que el período de curado tuvo un impacto en los resultados obtenidos, ya que las condiciones de curado favorecieron el crecimiento de hongos (Figura 14) , es por esta razón que las pruebas con un periodo de curado de 30 días presentaron resistencias menores que las muestras con 15 días de curado. La presencia de estos hongos provocó un agrietamiento interno en las muestras del suelo.



Figura 14. Muestra con presencia de hongos. Fuente: Elaboración propia

Se puede correlacionar estos resultados con los de límites de consistencia (LL), ya que al tener un porcentaje del 2 % de aditivo, se necesita un mayor porcentaje de agua para pasar de un estado semilíquido a uno plástico del suelo, lo que provoca que esté presente menores deformaciones respecto a la carga aplicada [74-75]. En la Tabla 6 se muestran las condiciones de ensayo para las muestras de suelo junto con los resultados obtenidos.

Tabla 6. Condiciones de ensayo y resultados obtenidos para las arcillas.

<b>Suelo</b>	<b>Y<sub>m</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Relación H/D</b>	<b>Esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cohesión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>C</b>	1.67 ± 0.02	34.96 ± 0.09	2.22 ± 0.02	1.37 ± 0.17	0.69 ± 0.09
<b>E2-15</b>	1.68 ± 0.01	33.63 ± 0.01	2.23 ± 0.03	2.85 ± 0.028 <sup>a</sup>	1.42 ± 0.01 <sup>a</sup>
<b>E4-15</b>	1.71 ± 0.04	32.81 ± 0.01	2.21 ± 0.03	2.12 ± 0.40	1.06 ± 0.2 <sup>a</sup>
<b>E8-15</b>	1.67 ± 0.01	32.32 ± 0.02	2.20 ± 0.02	1.63 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.82 ± 0.06
<b>E2-30</b>	1.69 ± 0.01	32.84 ± 0.01	2.23 ± 0.03	2.43 ± 0.14 <sup>a,b</sup>	1.22 ± 0.07 <sup>a</sup>
<b>E4-30</b>	1.67 ± 0.02	31.74 ± 0.02	2.2 ± 0.07	2.15 ± 0.24 <sup>a</sup>	1.07 ± 0.12 <sup>a</sup>
<b>E8-30</b>	1.67 ± 0.003	32.03 ± 0.02	2.24 ± 0.01	1.95 ± 0.24	0.97 ± 0.12

Nota: los valores se expresaron como media ± desviación estándar. Misma letra en cada columna indican diferencias estadísticamente no significativas en  $p > 0.05$ .

Fuente: Elaboración propia

El valor más alto a la resistencia a compresión y cohesión del suelo fue registrado para E2-15, por lo que se le atribuye que esta ganancia de fuerzas entre partículas en la matriz del suelo se desarrolle al recubrimiento del aditivo enzimático [76].

Kolhe P. et al. [15] utilizaron dos aditivos enzimáticos (Terrazyme y DZ-2X) en un estudio para mejorar una arcilla altamente plástica, obteniendo incrementos en la resistencia a la compresión de 131.39 % y 112.89 %, respectivamente. Al comparar estos resultados con los más favorables de la presente investigación, se observa una diferencia positiva a favor de los aditivos Terrazyme y DZ-2X de 23.39 % y 4.89 %, respectivamente. No obstante, estos resultados podrían variar por la formulación química de cada aditivo, es por esto que es fundamental estudiar el comportamiento de la estabilización enzimática con diferentes aditivos y con una amplia variedad de tipos de arcillas. Contar con más información sobre esta técnica de estabilización permite a los ingenieros seleccionar de

manera más informada el método, la técnica y el material más adecuados para cada caso, optimizando así los resultados en función de las características específicas del suelo.

#### 4.5. Resultados de Nanoindentación

Siguiendo la metodología anteriormente planteada, las mediciones se realizaron para las muestras de suelos C y E2 ya que presentan el mayor aumento de la resistencia a la compresión. La Tabla 7 muestra las propiedades micromecánicas resultantes de la prueba de nanoindentación, donde se observó que el suelo E2 tuvo valores más altos de  $E_r$  y  $H$  en comparación del suelo C. Se puede observar que la profundidad de penetración máxima para el suelo estabilizado se ve reducida un 10 % en contraste con el suelo sin aditivo. Los resultados indican que los valores obtenidos son característicos de suelos blandos [62], [67]. El valor del módulo de elasticidad aumentó un 16 % al añadir el aditivo enzimático: además este suelo desarrolló una dureza mayor que el suelo C.

Tabla 7. Propiedades micromecánicas del suelo C, E2 y algunas arcillas blandas.

Suelo	$E_r$ (GPa)	$H$ (GPa)	$h_{\text{máx}}$ (nm)	Referencia
<b>C</b>	$4.88 \pm 0.06$	$0.14 \pm 0.02$	$1244.3 \pm 55.2$	-
<b>E2</b>	$5.67 \pm 0.39^a$	$0.18 \pm 0.01^a$	$1116.2 \pm 42.6^a$	-
<b>Arcilla Blanda</b>	$4.14 \pm 0.41$	$0.18 \pm 0.05$	$432.2 \pm 63.5^b$	[24]

Nota: los valores se expresaron como media  $\pm$  desviación estándar. Misma letra en cada columna indican diferencias estadísticamente no significativas en  $p > 0.05$ .

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento elastoplástico del suelo se vio afectado por la adición enzimática dentro de la matriz de las partículas del suelo, lo que produjo una variación del módulo elástico como consecuente de los cambios en la estructura y/o mineralogía de las muestras [77-78]. Esto resulta de mucha ayuda al correlacionar todos los resultados obtenidos de las pruebas índices y mecánicas (límites de consistencia, masa volumétrica compactada, resistencia a la compresión y nanoindentación). En la Figura 15 se muestran las curvas de carga y descarga de las pruebas de nanoindentación para C y E2.

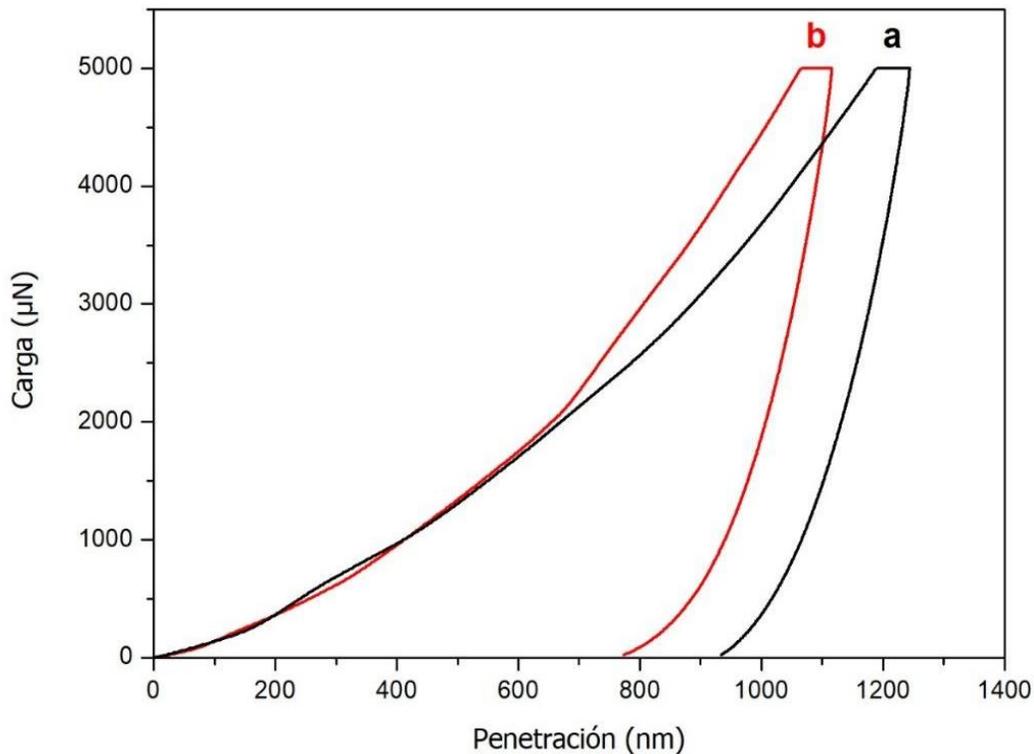


Figura 15. Curvas de nanoindentación para el suelo C (a) y E2 (b). Fuente: Elaboración propia

En la Figura 16 se muestra el espectro FT-IR correspondiente al aditivo enzimático, donde se aprecian los principales grupos funcionales correspondientes a señales de vibración de estiramiento a  $3515\text{ cm}^{-1}$ , las vibraciones de flexión a  $1645\text{ cm}^{-1}$  corresponden al grupo hidroxilo (-OH). Las bandas obtenidas en el rango de  $1450\text{ cm}^{-1}$  se relacionan a  $\text{CH}_2$  estiramiento [79], para las señales de radiación  $2941\text{ cm}^{-1}$  y  $2850\text{ cm}^{-1}$  que corresponden a la vibración de estiramiento (asimétrica) del  $\text{CH}_2$  y la vibración de estiramiento (simétrica) del CH respectivamente [80]. En la región  $936\text{ cm}^{-1}$  se observa el estiramiento de enlaces C-O. La banda  $1105\text{ cm}^{-1}$  corresponde a grupos C-O-C [81]. Durante décadas la espectroscopia infrarroja se ha empleado para caracterizar la estructura, los enlaces y las propiedades químicas de los minerales arcillosos [82].

Las bandas principalmente identificadas en arcillas (Figura 17) se deben principalmente a la vibración de estiramiento y flexión de Si-O, Al-O y -OH [83]. En este trabajo de investigación, los espectros FT-IR de los suelos C, E2, E4 y E8 mostraron transmisiones en las bandas con longitud de onda de  $1032\text{ cm}^{-1}$  corresponden a grupos funcionales

siloxanos (Si-O, Si-O-Si), la banda de  $3624\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a -OH. A pesar que las muestras fueron secadas y trituradas, los resultados mostraron radiaciones en los rangos de  $3428\text{ cm}^{-1}$  y  $1637\text{ cm}^{-1}$  lo cual se adjudica a la vibración de agua adsorbida (H-O-H) [61], los grupos funcionales en la longitud de onda de  $1432\text{ cm}^{-1}$  a hidrocarburos CH, mientras que las bandas asignadas a los picos  $524\text{ cm}^{-1}$  y  $468\text{ cm}^{-1}$  pertenecen a asignaciones de Si-O, Si-O-Al y Si-O-Fe [61].

Se puede observar que al mezclar el suelo arcilloso con las enzimas no hay una formación de nuevos grupos funcionales, sin embargo las bandas presentadas en el rango de  $1032\text{ cm}^{-1}$  para las dosificaciones más altas de enzima (Figura 17 curva c y d) presenta una disminución de su intensidad por lo que se atribuye a cambios en el recubrimiento de sílice [84].

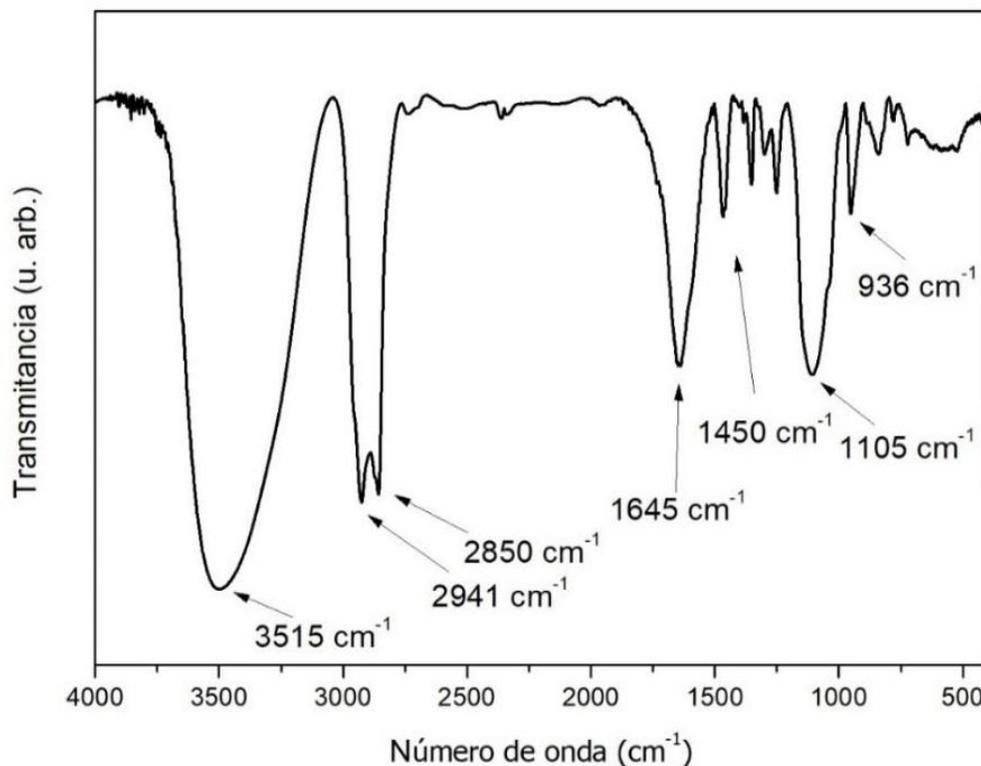


Figura 16. Espectro FT-IR del aditivo enzimático. Fuente: Elaboración propia. Para los suelos con una dosificación de aditivo presenta un aumento en lectura de transmitancia para las bandas de  $2925\text{ cm}^{-1}$  y  $2860\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la presencia de enlaces CH [57], lo cual concuerda con el rango de uno de los principales grupos funcionales de las enzimas como se muestra en la Figura 16. Al observar este fenómeno

se puede atribuir a la formación de enlaces entre los CH y los grupos funcionales de silicio, esto es beneficioso para rellenar los microporos de las arcillas y su superficie laminar haciendo que cationes presentes en el agua no se adhieran al suelo, provocando una estabilización ente las capas de la arcilla y consecuente a esto una reducción del IP y aumento en la resistencia a compresión [49].

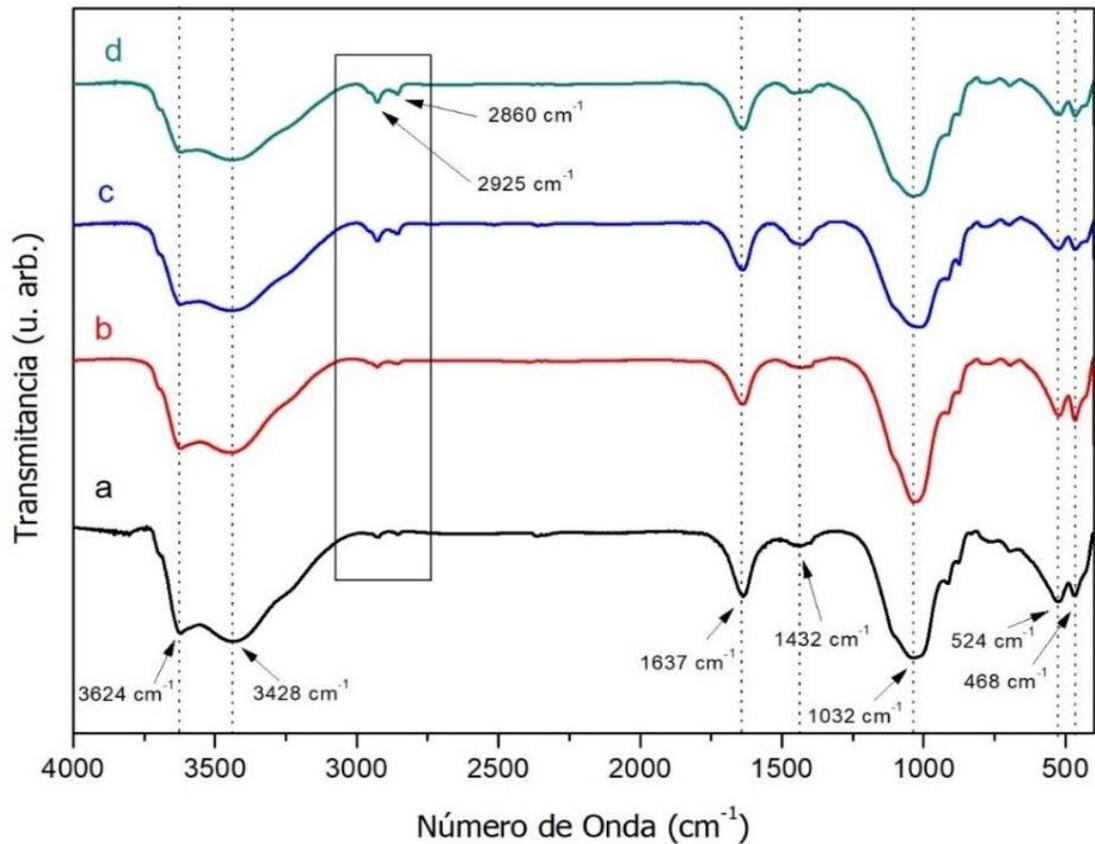


Figura 17. Espectros FT-IR de las arcillas C (a), E2 (b), E4 (c), E8 (d).

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.7. Análisis DRX

En la Figura 18 se muestran los análisis DRX del suelo con y sin estabilización enzimática. Se puede observar en la composición mineralógica de las arcillas estudiadas presencia de minerales tales como la albita (22°, 24° y 28°), calcita (29°), montmorillonita (6°, 19° y 35°), cuarzo (21°, 27°, 39° y 42°) e illita (25° y 33°) [57-60]. El difractograma

DRX característico del suelo C presenta lecturas en los mismos rangos de  $2\theta$  que los mostrados del suelo E2, E4 y E8, por lo que se deduce que no hay formaciones de nuevos

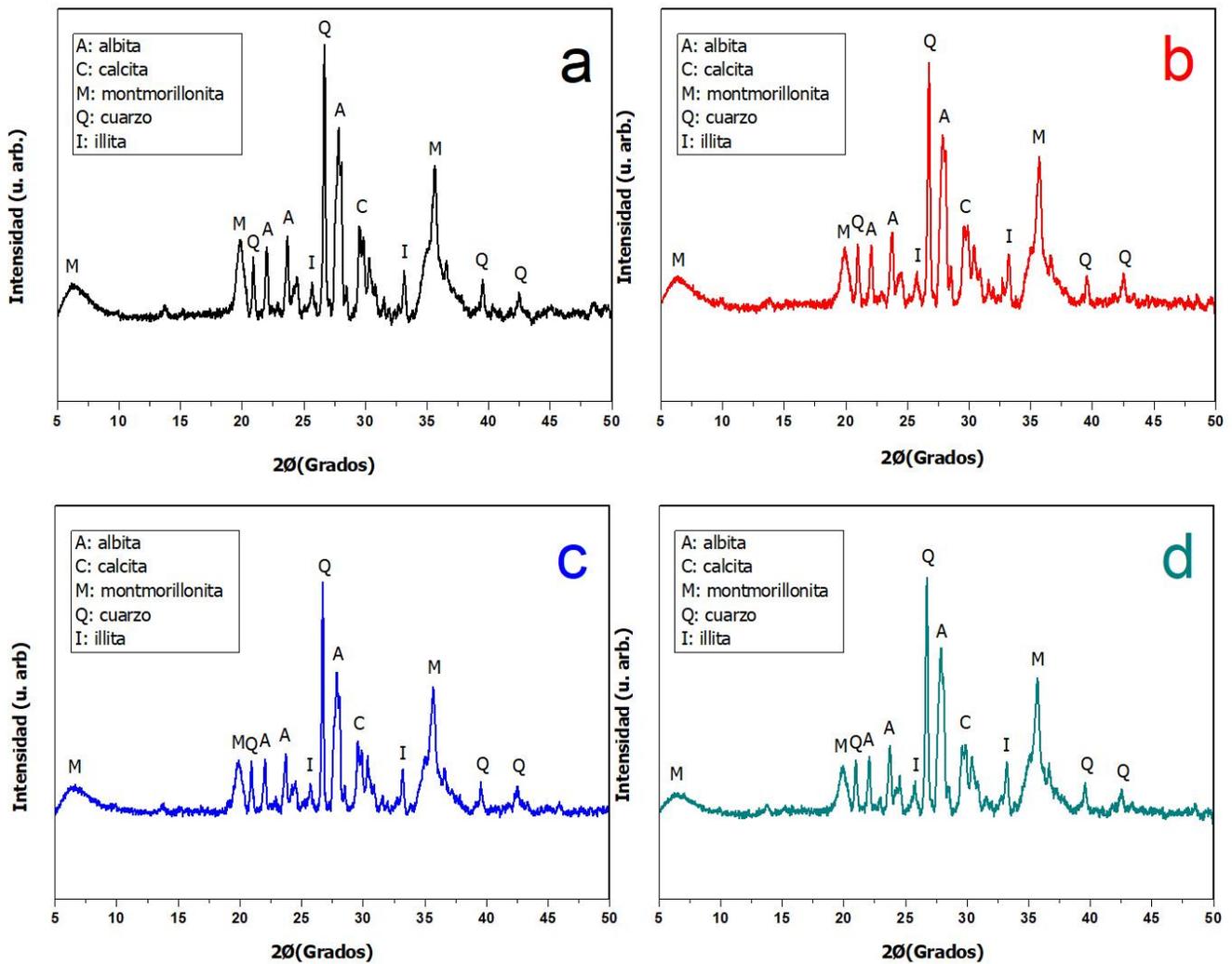


Figura 18. Espectros DRX de los suelos C (a), E2 (b), E4 (c), E8 (d).

Fuente: Elaboración propia.

minerales durante el proceso de estabilización, sin embargo, se puede apreciar que en las señales características de los minerales antes mencionados muestran una reducción en su intensidad, este cambio se atribuye a la adición del aditivo al suelo [85].

La Tabla 8 muestra las distancias interplanares ( $D_{hkl}$ , nm) y adicionalmente un análisis comparativo entre el suelo C, E2, E4 y E8, calculando a partir de los espectros XRD obtenidos, donde se observa que las distancias interplanares entre los planos atómicos del cristalito cambian según su dosificación. Los minerales albita, illita, cuarzo y calcita

presentan una reducción de su distancia interplanar; esto puede causar un efecto de compacidad a un nivel de subgrano, lo que consecuentemente a esto presentar una mayor resistencia a la compresión del suelo [86].

Se observó una reducción en  $D_{hkl}$  en los suelos con aditivo enzimático, específicamente en los planos cristalinos de la albita a  $2\theta = 24^\circ$ , illita a  $25^\circ$ , cuarzo a  $27^\circ$ , calcita a  $29^\circ$  y montmorillonita a  $35^\circ$ . En el caso del suelo C, las medidas de  $D_{hkl}$  para los mismos minerales fueron de 36.38 nm, 24.58 nm, 39.20 nm, 7.22 nm y 5.29 nm, respectivamente.

Es notable que el suelo E2 mostró la mayor disminución en  $D_{hkl}$  para los minerales albita, illita y cuarzo, lo cual puede correlacionarse con mejoras en la resistencia a la compresión, según los resultados de las pruebas de compresión no confinada [86]. Por otro lado, los suelos E4 y E8 exhibieron cambios con menor magnitud en comparación con E2. Aun así, los minerales illita y montmorillonita mostraron una reducción en su distancia interplanar al aumentar la dosificación de enzimas. En cuanto a los minerales albita, cuarzo y calcita, no mostraron una tendencia clara, aunque se observaron cambios porcentuales.

Tabla 8. Distancias interplanares ( $D_{hkl}$ , nm) y un análisis comparativo entre el suelo C contra E2, E4 y E8.

<b>Mineral</b>	<b>C <math>D_{hkl}</math> (nm)</b>	<b>E2 <math>D_{hkl}</math> (nm)</b>	<b>E4 <math>D_{hkl}</math> (nm)</b>	<b>E8 <math>D_{hkl}</math> (nm)</b>	<b>Cambio E2 (%)</b>	<b>Cambio E4 (%)</b>	<b>Cambio E8 (%)</b>
<b>Albita (<math>24^\circ</math>)</b>	36.38	24.23	26.52	24.87	-33.3	-27.1	-31.6
<b>Illita (<math>25^\circ</math>)</b>	24.58	20.84	21.13	21.48	-15.2	-14	-12.6
<b>Cuarzo (<math>27^\circ</math>)</b>	39.20	32.62	42.90	34.03	-16.8	-9.4	-13.2
<b>Calcita (<math>29^\circ</math>)</b>	7.22	6.33	6.22	6.15	-12.3	-13.8	-14.8
<b>Montmorillonita (<math>35^\circ</math>)</b>	5.29	6.11	5.83	5.62	+15.5	+10.2	+6.2

Fuente: Elaboración propia.

Se sabe que los minerales montmorillonita presentan un espesor de partícula muy pequeño (1 - 5 nm) y un área superficial muy grande [87], además, estas tienen una carga negativa en su superficie provocada por la sustitución isomorfa de algunos elementos [28], [88]. Cuando el suelo entra en contacto con las partículas positivas del agua estas

son atraídas y atrapadas dentro de las partículas del suelo, por lo que estos materiales presentan grandes cambios volumétricos [89-90]. Al añadir proporciones de aditivo enzimático, este mineral presentó un aumento del  $D_{hkl}$ , lo que puede afectar la potencial zeta entre el agua y la arcilla, debido a la adherencia del suelo con el estabilizador (46).

#### **4.8. Resultados del análisis de imágenes**

El análisis de la textura de las imágenes de microscopía óptica mostró un mayor ordenamiento en las partículas del suelo tras la adición del aditivo enzimático en comparación con el suelo no estabilizado (Figura 19a - 19d y Figura 20e - 20g ). Se ha demostrado en otras investigaciones que es apropiado utilizar la teoría fractal para analizar la estructura de los poros del suelo (51).

En este estudio las arcillas estabilizadas no presentaron cambios en la rugosidad utilizando la dimensión fractal como parámetro (Tabla 9). Chun et al. [44], plantearon la entropía del suelo como una medida de aleatoriedad en un conjunto de elementos con una riqueza de poros/suelo. Los valores obtenidos indican que añadiendo tanto un 2, 4 y 8 % de enzimas al suelo se produce una disminución de la entropía provocando una mejor distribución de las partículas de arcilla y del tamaño de los poros, ya que valores bajos de entropía relacionan superficies homogéneas, y para valores de dimensión fractal cercanos a 2 con superficies lisas [47]. Se observó que el cambio más significativo en la entropía y la dimensión fractal se presentó entre la arcilla C y E2; sin embargo, es importante mencionar que estos mismos materiales presentaron una diferencia significativa en la resistencia a la compresión no confinada, por lo que existe una relación entre la disposición de las partículas del suelo y su incremento en la resistencia a la compresión no confinada.

El periodo de curado influyó en los valores de entropía obtenidos. Al analizar las mismas dosificaciones de aditivo enzimático, se observó un aumento en la entropía con el paso del tiempo. Esto puede atribuirse a la presencia de materia orgánica (hongos), la cual, al estar presente en la matriz del suelo, modifica el ordenamiento de sus partículas y la relación de poros. Confirmado esto, se registraron valores de entropía más altos para las muestras E8 en comparación con la muestra E2, debido al mayor porcentaje de aditivo añadido, que resulta en una mayor cantidad de materia orgánica introducida. El

dimensionamiento superficial en 3D (Figura 19h – 19k y Figura 20l – 20n) refuerza lo anterior al observar la rugosidad aparente del suelo y su incremento en función de la dosificación del aditivo.

Tabla 9. Entropía (E) y dimensión fractal (DF) de suelos con y sin aditivo enzimático

<b>Suelo</b>	<b>E</b>	<b>DF</b>
<b>C</b>	7.20 ± 0.08	2.73 ± 0.02
<b>E2-15</b>	6.90 ± 0.05 <sup>a</sup>	2.72 ± 0.01
<b>E4-15</b>	6.99 ± 0.07 <sup>a</sup>	2.73 ± 0.01
<b>E8-15</b>	7.05 ± 0.06 <sup>b</sup>	2.72 ± 0.01
<b>E2-30</b>	7.00 ± 0.07 <sup>b</sup>	2.73 ± 0.01
<b>E4-30</b>	7.04 ± 0.06 <sup>b</sup>	2.72 ± 0.01
<b>E8-30</b>	7.11 ± 0.08	2.72 ± 0.02

Nota: los valores se expresaron como media ± desviación estándar. Misma letra en cada columna indican diferencias estadísticamente no significativas en  $p > 0.05$ .

Fuente: Elaboración propia.

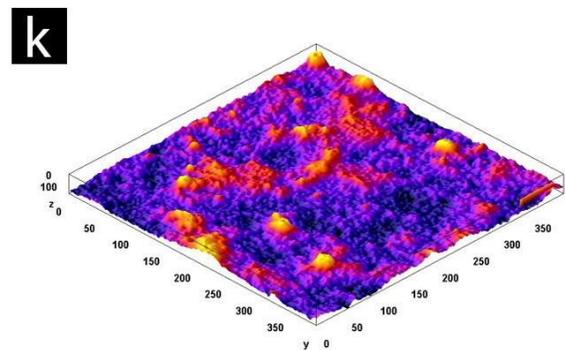
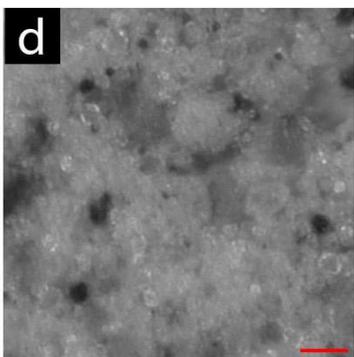
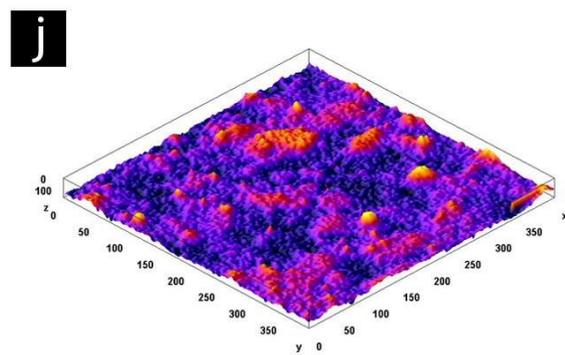
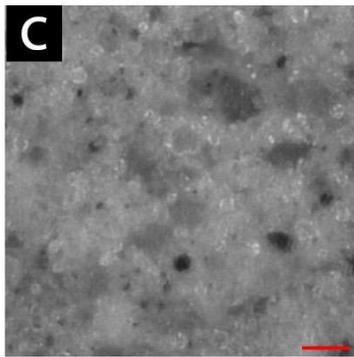
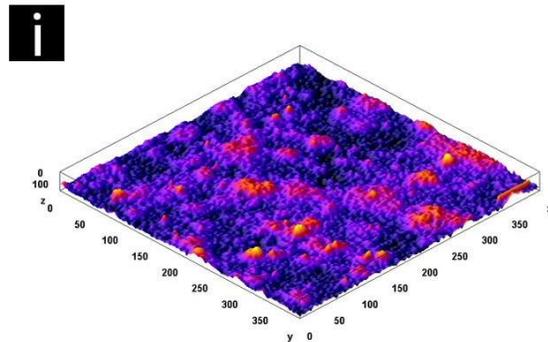
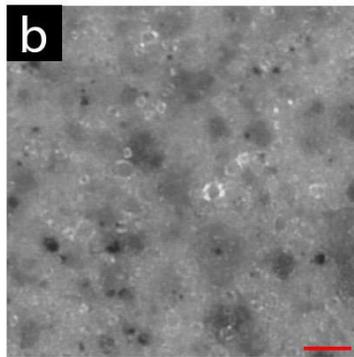
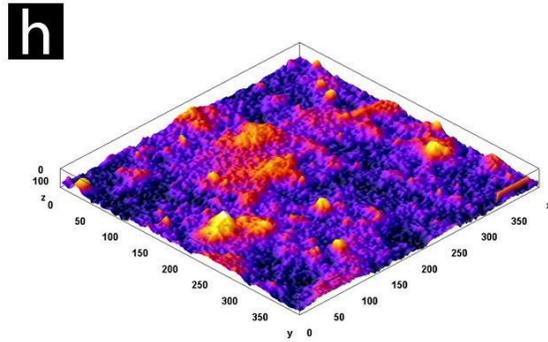
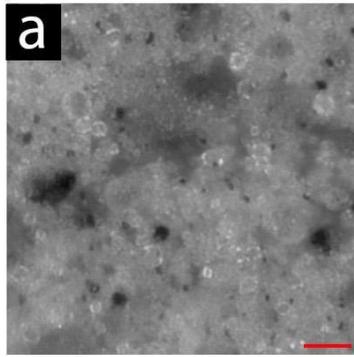


Figura 19. Imágenes de microscopía óptica de suelo C (a), E2-15, E4-15 y E8-15 (b, c y d respectivamente), gráficos de intensidad de superficie 3D de C (h), E2-15, E4-15 y E8-15 (i, j y k respectivamente). Barra de escala de 100  $\mu$ m.  
Fuente: Elaboración propia.

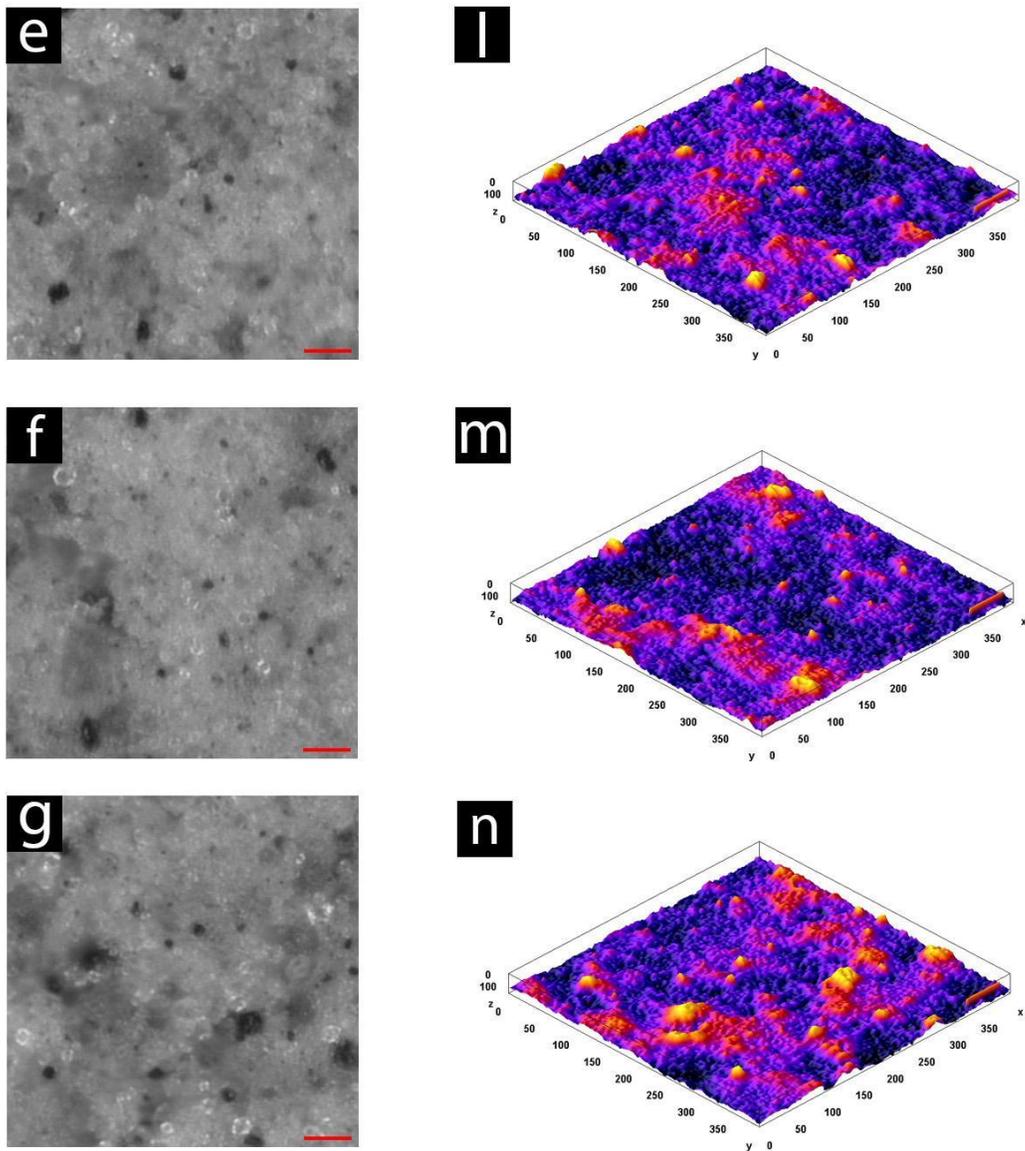


Figura 20. Imágenes de microscopía óptica de E2-30, E4-30 y E8-30 (e, f y g respectivamente), gráficos de intensidad de superficie 3D para los suelos E2-30, E-30 y E8-30 (l, m y n respectivamente). Barra de escala de 100  $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia.

#### 4.9. Resultados SEM-EDS

Las imágenes SEM son valiosas herramientas para la caracterización morfológica de los suelos, debido a que se puede estudiar directamente la superficie del mineral [42]. Esta información morfológica de minerales es fundamental en el procesamiento de minerales

para predecir el comportamiento mecánico del suelo [53]. En la Figura 21 se muestran imágenes SEM del suelo C para diferentes aumentos, en la Figura 21a y b se muestra la distribución de los aglomerados de arcilla donde se midió el tamaño máximo de ellos, lo cual resultó de 20 - 25  $\mu\text{m}$ . La Figura 21c y d representan imágenes de un aglomerado de partículas de arcilla a una escala de 1  $\mu\text{m}$ , donde se aprecia que las partículas de este contienen formas laminares amorfas, también se observa dentro del aglomerado agrietamientos o redes de microporos, esto debido al acomodo estructural de las moléculas de arcilla [86].

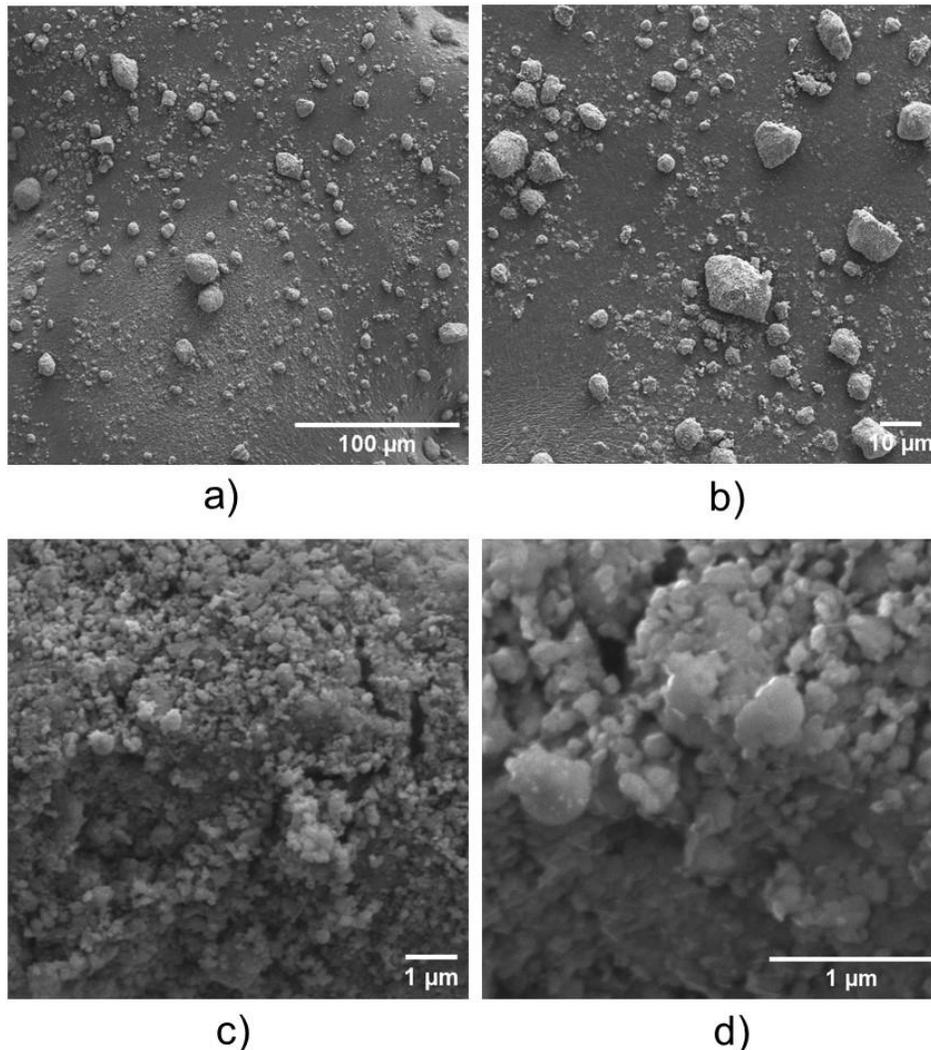


Figura 21. Imágenes SEM del suelo C, para diferentes aumentos, a) 200X barra de escala 100  $\mu\text{m}$ , b) 500X barra de escala 10  $\mu\text{m}$ , c) 10,000X barra de escala 1  $\mu\text{m}$ , d) 20,000X barra de escala 1  $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 22a y b se muestran imágenes de la distribución de aglomerados del suelo E2, teniendo un tamaño máximo de 8-12  $\mu\text{m}$ . Estos aglomerados correspondientes a E2 presentaron una red gelatinosa alrededor de las partículas de arcilla, por lo que es evidente que los vacíos internos de los aglomerados son menores en comparación del suelo C. Estos resultados justifican el aumento a la resistencia a compresión no confinada, la cohesión de las arcillas, la masa volumétrica compacta y dureza, ya que al envolver las partículas de arcillas con las enzimas aumentan las fuerzas intermoleculares, así como los esfuerzos efectivos en el suelo al contener una relación de microporos más pequeña [91].

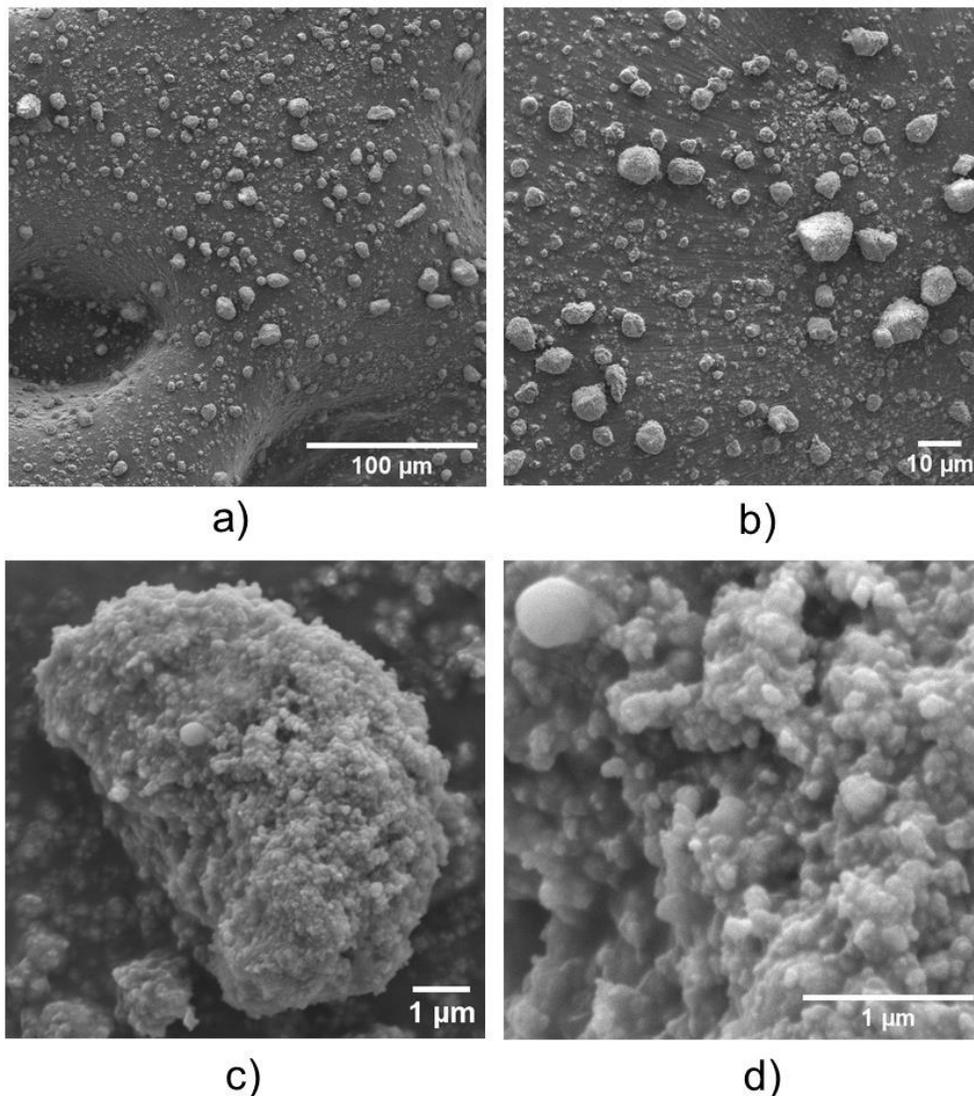


Figura 22. Imágenes SEM del suelo E2, para diferentes aumentos, a) 200X barra de escala 100  $\mu\text{m}$ , b) 500X barra de escala 10  $\mu\text{m}$ , c) 10,000X barra de escala 1  $\mu\text{m}$ , d) 20,000X barra de escala 1  $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del suelo E8 se obtuvo valores del tamaño de los aglomerados máximos de 11 – 17  $\mu\text{m}$  (Figura 23a y b) y en las Figuras 23c y d los aglomerados presentaron una forma más compacta y sin grietas con una red gelatinosa que envuelve al aglomerado en comparación con el suelo C, pero con una intensidad menor que E2.

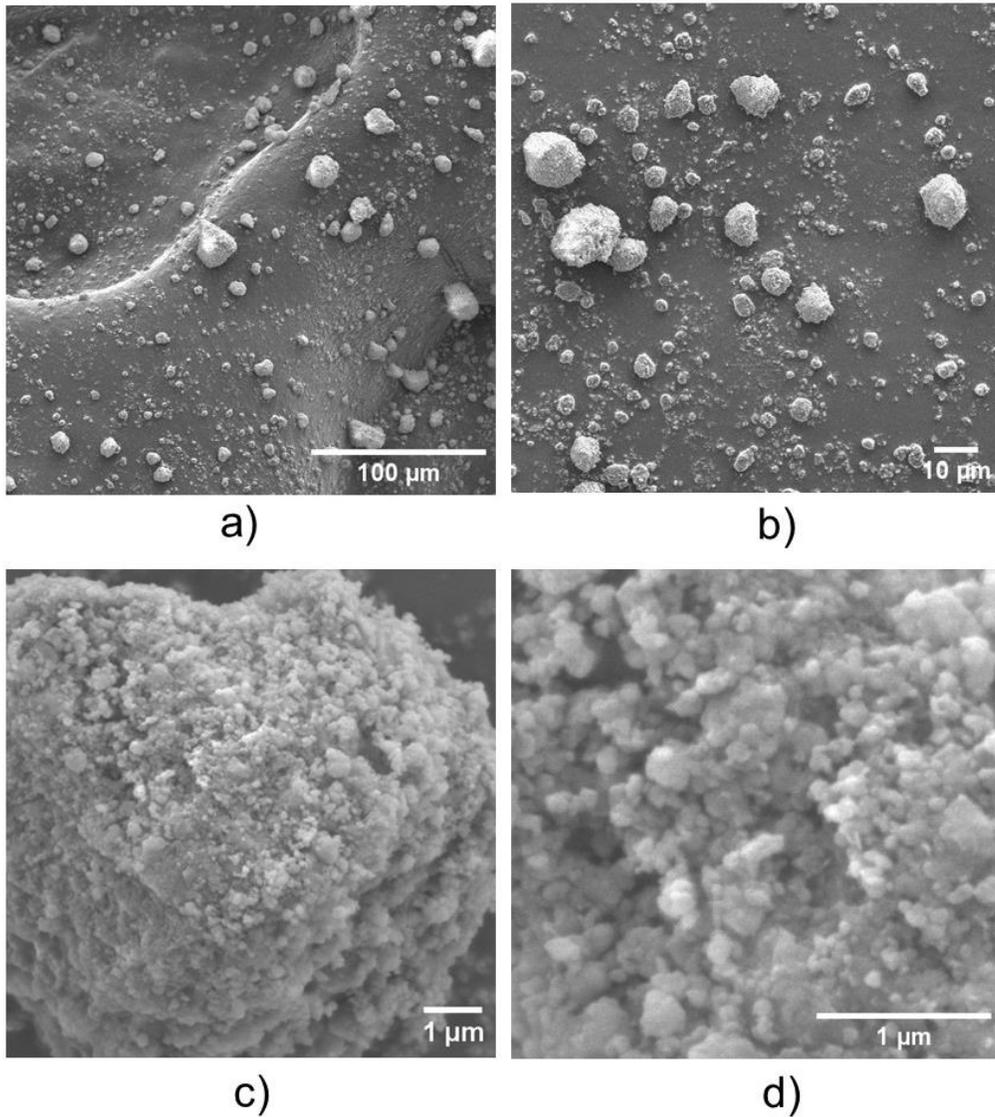


Figura 23. Imágenes SEM del suelo E8, para diferentes aumentos, a) 200X barra de escala 100  $\mu\text{m}$ , b) 500X barra de escala 10  $\mu\text{m}$ , c) 10,000X barra de escala 1  $\mu\text{m}$ , d) 20,000X barra de escala 1  $\mu\text{m}$ . Fuente: Elaboración propia.

Haciendo una comparativa entre las imágenes SEM de los suelos C, E2 y E8 (Figura 21a, 22a y 23a) se puede apreciar que los aglomerados más grandes en los suelos estabilizados proporcionan una mejor uniformidad en contraste con C, además de que el tamaño de las aglomeraciones para el caso de E2 y E8 son más pequeñas que C. En la Figura 21b, para el caso de C, las aglomeraciones más grandes adoptan una forma más amorfa y están más dispersas que las aglomeraciones pequeña, por otro lado, al observar el suelo E2 (Figura 22b y 22c), se identificó un agrupamiento más compacto de las aglomeraciones y una morfología más redondeada, al comparar estos comportamientos con los valores de entropía y dimensión fractal para las arcillas C, E2 y E8, se confirma un mayor ordenamiento entre los aglomerados de suelo con dosificaciones bajas de enzimas. Al observar las imágenes con un acercamiento de 50,000X para los suelos C, E2 y E8 (Figura 24a, b y c) revelaron un tamaño de partícula de la arcilla por debajo de los 100 nm, así mismo se evidenció el relleno de los microporos tanto para el suelo E2 como E8.

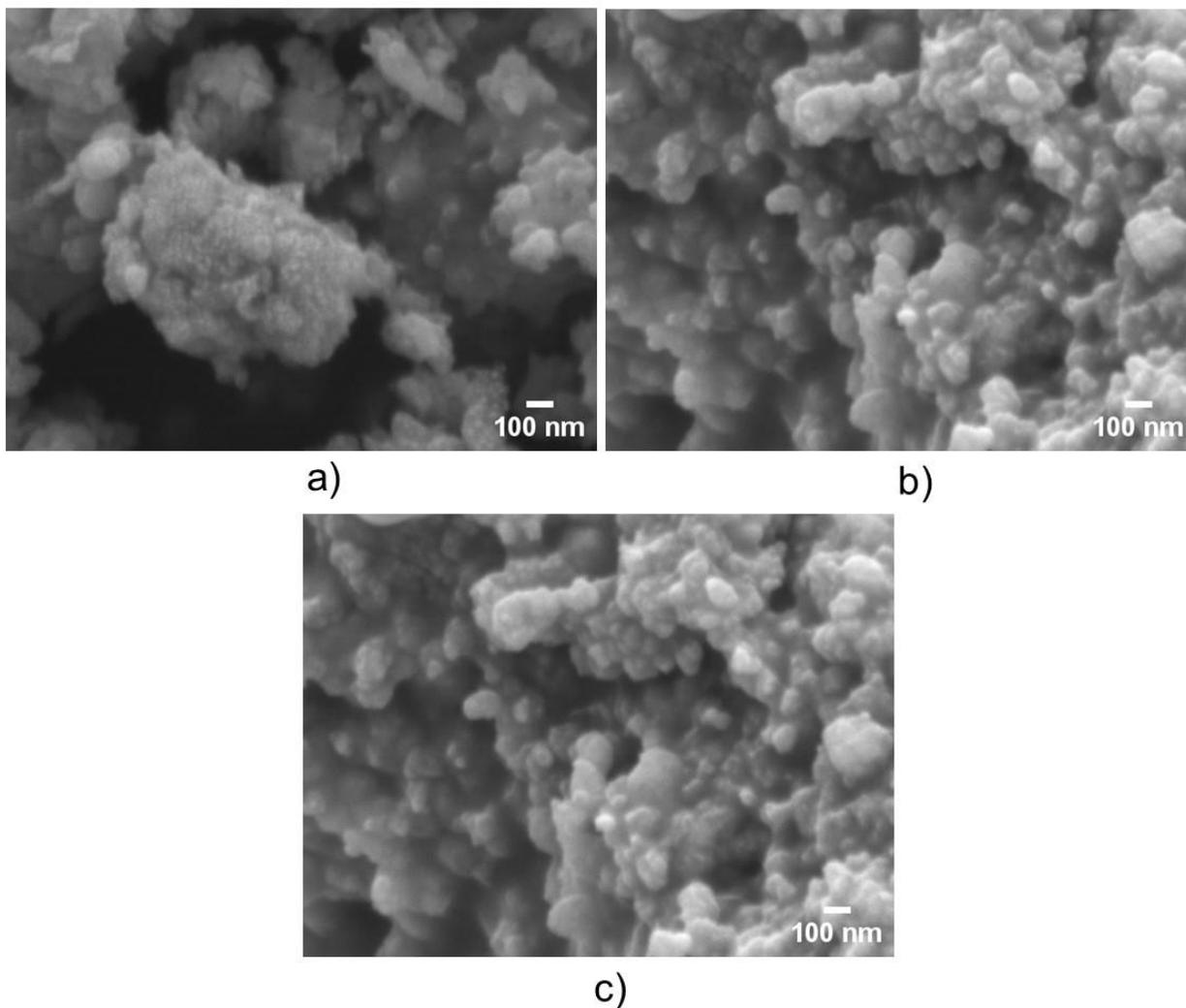


Figura 24. Imágenes SEM con aumento 50,000X barra de escala 100 nm a) suelo C, b) suelo E2, c) suelo E8. Fuente: Elaboración propia.

Para confirmar la presencia de la red gelatinosa inducida por la adición de enzimas dentro de la red de microporos en el suelo E2 y E8, se realizó el análisis utilizando EDS acoplado a SEM. Se obtuvieron espectros EDS para suelos C, E2, y E8 (Figura 25) donde son claros los picos intensos de aluminio (Al), silicio (Si), seguidas de un nivel más bajo de magnesio (Mg), hierro (Fe) y calcio (Ca), elementos básicos en la composición química de arcillas [16]. En cambio para la intensidad asociada al elemento carbono (C) solo se percibe en el suelo E2 (Tabla 10), esto quiere decir que el recubrimiento enzimático al 2 % dentro del suelo está asociado con elementos abundantes en carbonos y que al

aumentar las concentraciones de enzima no se tiene una respuesta de igual magnitud debido a diversos factores que pueden afectar las reacciones de las enzimas, como el pH, concentración del sustrato, concentración de sales (iones). Cabe destacar que para la intensidad del silicio se vio afectada y disminuida al estabilizar con las enzimas (Tabla 10), este análisis también es corroborado por los resultados obtenidos en la prueba de FT-IR de las arcillas, quienes afirman la presencia de grupos funcionales CH y una reducción de intensidad para los silicatos [57], [84].

Tabla 10. Resultados cuantificados de EDS para C, E2 y E8.

<b>Suelo</b>	<b>C</b>		<b>E2</b>		<b>E8</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Peso %</b>	<b>Átomos %</b>	<b>Peso %</b>	<b>Átomos %</b>	<b>Peso %</b>	<b>Átomos %</b>
<b>C</b>	0	0	5.2	8.7	0	0
<b>O</b>	49.2	65.1	50.3	62.8	48.6	64.6
<b>Na</b>	0.6	0.6	0.2	0.2	0.4	0.3
<b>Mg</b>	2.5	2.2	2.7	2.2	3.1	2.7
<b>Al</b>	10.1	7.9	8.9	6.6	10.3	8.1
<b>Si</b>	25	18.8	20.6	14.7	24.2	18.3
<b>K</b>	0.7	0.4	1.1	0.6	1.3	0.7
<b>Ca</b>	2.8	1.5	2.7	1.4	3.1	1.6
<b>Ti</b>	0.6	0.3	0.7	0.3	1	0.5
<b>Mn</b>	0	0	0.1	0.1	0.1	0
<b>Fe</b>	8.2	3.1	6.8	2.4	7.4	2.8
<b>Cu</b>	0.2	0.1	0.4	0.1	0.3	0.1
<b>Cr</b>	0	0	0.1	0	0.1	0

Fuente: Elaboración propia.

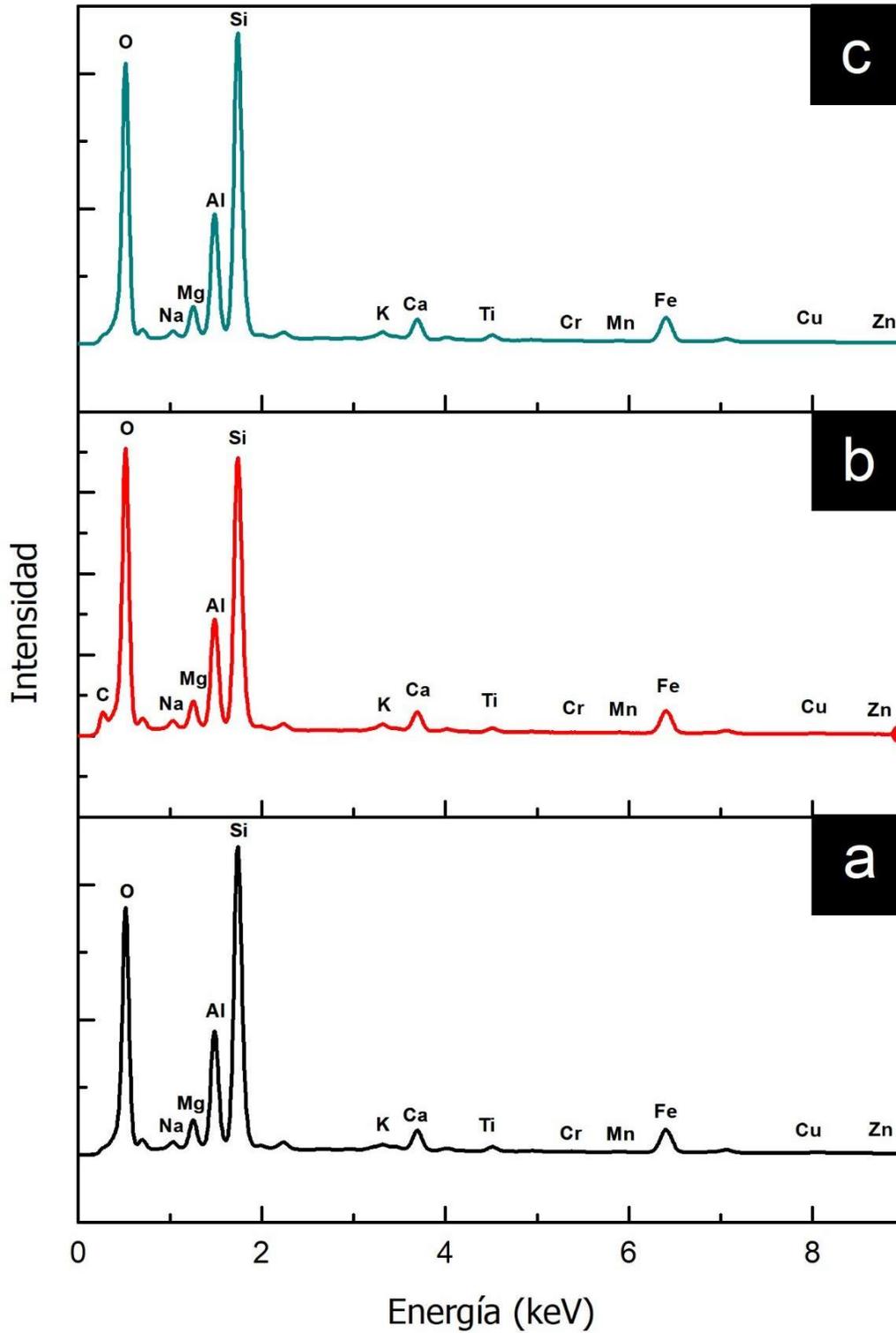


Figura 25. Espectros EDS del suelo C (a), E2 (b) y E8 (c). Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los de Kumar Vaddi et al. [49], quien reportó un tamaño de partícula de 18.02  $\mu\text{m}$  para una arcilla no estabilizada y una reducción a 12.54  $\mu\text{m}$  al emplear una bioenzima estabilizadora basada en carbono y silicio, se confirma que la estabilización enzimática actúa como un agente aglomerante en las partículas de arcilla. Esta disminución en el tamaño de partícula sugiere que la bioenzima facilita la interacción entre las partículas del suelo, promoviendo la formación de enlaces que agrupan las partículas más pequeñas, lo que mejora la estructura del material. Los estudios SEM y EDS realizados en ambas investigaciones muestran resultados similares, al evidenciar que las arcillas tienen una notable afinidad por los elementos de carbono. Este comportamiento es consistente, a pesar de las diferencias en los tipos de aditivos enzimáticos utilizados en cada estudio. Los análisis SEM-EDS en ambas investigaciones revelaron que la presencia de carbono en las arcillas estabilizadas genera una mejora en la cohesión de las partículas, lo que refuerza la hipótesis de que los aditivos enzimáticos actúan como agentes de unión, modificando la microestructura del suelo y mejorando sus propiedades mecánicas.

#### **4.10. Dimensionamiento de cimentación y cálculo de capacidad portante del suelo**

Para esta investigación, se optó por el diseño de una zapata aislada, dado que este tipo de cimentación es uno de los más utilizados en el ámbito de la construcción de viviendas. Este sistema se configuró con una geometría cuadrada, por lo que el área de contacto se definió como  $B \times B$ . Se propuso un valor de  $B$  de 1 m, mientras que la profundidad de desplante, al tratarse de una cimentación superficial, se estableció en 1 m con el fin de remover cualquier material sedimentado, hierbas, raíces y otros desperdicios [91]. En la Tabla 11 se presentan los valores obtenidos en el cálculo de la capacidad de carga para los parámetros derivados de pruebas previas realizadas en los suelos estudiados. Los resultados de  $q_a$  para la arcilla C mostraron valores de  $2.022 \pm 0.288 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que las muestras E2-15 y E2-30 exhibieron los valores más elevados de este parámetro, con rangos de  $4.013 \pm 0.047 \text{ kg/cm}^2$  y  $3.454 \pm 0.233 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente. Se observó que al aumentar la dosificación de la enzima, la capacidad de carga tiende a asemejarse más a la de la muestra C. Además, se encontró que el período de curado tuvo un mayor impacto en las muestras E2 que en las E4 y E8, con una reducción del 14 % en este valor al prolongar el período de curado. Los rangos de capacidad de carga para las arcillas E2

se consideran como semiduras, mientras que para los demás casos, el suelo se clasifica con una consistencia media.

Tabla 11. Valores de capacidad de carga de las arcillas con los parámetros correspondientes utilizados durante el cálculo.

Suelo	Df, B y L (m)	Nc (adim.)	Fr (adim.)	$\sigma_v$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	q <sub>a</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>C</b>	1	7.71	0.35	0.1675 ± 0.023	0.69 ± 0.09	2.022 ± 0.288 <sup>a</sup>
<b>E2-15</b>	1	7.71	0.35	0.16842 ± 0.012	1.42 ± 0.01 <sup>a</sup>	4.013 ± 0.047 <sup>b</sup>
<b>E4-15</b>	1	7.71	0.35	0.17065 ± 0.043	1.06 ± 0.12 <sup>a</sup>	3.035 ± 0.66 <sup>b,c</sup>
<b>E8-15</b>	1	7.71	0.35	0.16734 ± 0.014	0.82 ± 0.06	2.372 ± 0.197 <sup>a,c</sup>
<b>E2-30</b>	1	7.71	0.35	0.16880 ± 0.011	1.22 ± 0.07 <sup>a</sup>	3.454 ± 0.233 <sup>b,c</sup>
<b>E4-30</b>	1	7.71	0.35	0.16708 ± 0.020	1.07 ± 0.12 <sup>a</sup>	3.064 ± 0.404 <sup>b,c</sup>
<b>E8-30</b>	1	7.71	0.35	0.16742 ± 0.004	0.97 ± 0.12	2.799 ± 0.390 <sup>a,c</sup>

Nota: los valores se expresaron como media ± desviación estándar. Misma letra en cada columna indican diferencias estadísticamente no significativas en  $p > 0.05$ .

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12 se presenta una comparativa entre los suelos estabilizados y el suelo C. Se observa que el suelo E2 mostró un mejor desempeño en todas las pruebas realizadas durante la investigación, con la excepción de la masa volumétrica compactada. El aditivo enzimático actúo como un aglomerante de partículas del suelo, sin embargo, las dosificaciones al 8 % mostraron cambios menores tanto en resistencia a compresión como en los límites de consistencia. Esto se debe a un notable crecimiento de hongos, los cuales, al ser materia orgánica pueden aumentar la compactibilidad de los suelos debido a su estructura esponjosa. Por esta razón E2 no alcanzó la máxima masa volumétrica compactada. La morfología de los agregados en el suelo estabilizado al 2 % mostró una distribución de tamaño más pequeña, observada en las imágenes SEM. Estos resultados también se relacionan con el nivel de desorden y organización de la matriz suelo/poros, obtenida a partir del parámetro de entropía, y se evidenció una red gelatinosa principalmente en esta dosificación. Esta red gelatinosa aumentó la dureza del suelo en estado seco y a su vez incrementó el valor del módulo de elasticidad.

Tabla 12. Porcentaje de cambios de las pruebas realizadas comparando las muestras estabilizadas contra la muestra control.

		<b>Suelo</b>						
<b>Prueba</b>	<b>Parámetros</b>	<b>C</b>	<b>E2-15</b>	<b>E4-15</b>	<b>E8-15</b>	<b>E2-30</b>	<b>E4-30</b>	<b>E8-30</b>
<b>Límites consistencia</b>	Índice	0 %	17 %	13 %	10 %	17 %	9 %	5 %
	Plasticidad							
<b>Masa volumétrica compactada</b>	Hausner	0 %	11 %	17 %	19 %	6 %	13 %	9 %
<b>Compresión no confinada</b>	Cohesión	0 %	108 %	55 %	19 %	77 %	57 %	42 %
<b>Nanoindentación</b>	Módulo	0 %	16 %	-	-	-	-	-
	Elasticidad							
	Dureza	0 %	28 %	-	-	-	-	-
<b>FT-IR</b>	Grupos funcionales	-	CH	CH	CH	CH	CH	CH
<b>DRX</b>	Cambio en distancia interplanar	-	Mayor	Intermedio	Menor	-	-	-
<b>Análisis Imagen</b>	Entropía	0 %	4 %	3 %	2 %	3 %	2 %	1 %
	Dimensión Fractal	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<b>SEM-EDS</b>	Tamaño de aglomerados máx.	20-25 $\mu\text{m}$	8-12 $\mu\text{m}$	-	11-17 $\mu\text{m}$	-	-	-
	nuevos elementos	-	C	-	Ninguno	-	-	-
<b>Capacidad Portante</b>	Capacidad Portante	0 %	98 %	50 %	17 %	71 %	52 %	38 %

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al análisis DRX de los suelos, E2 presentó una distancia interplanar más corta en la mayoría de los minerales lo cual justifica la reducción de tamaño en los agregados observados en las imágenes SEM.

En la microestructura, se observó un aumento significativo de los grupos funcionales CH atribuidos al aditivo, corroborado por el análisis EDS que evidenció la presencia de elementos de carbono. Estos grupos funcionales favorecieron las propiedades de cohesión del suelo los cuales fueron comprobados con los resultados de compresión no confinada.

Como resultado de estas mejoras en las propiedades del suelo, se observó un incremento en la resistencia a la compresión, lo que a su vez condujo a una mayor capacidad portante del material. Este aumento en la resistencia es crucial en el diseño de cimentaciones, ya que permite al ingeniero estructural proponer secciones más pequeñas sin comprometer la capacidad de carga requerida. En este sentido, el uso de este aditivo enzimático para la estabilización de suelos arcillosos se presentó como una alternativa viable y eficiente.

Esta investigación presentó varias limitaciones que podrían haber influido y complementado de mejor manera en los resultados obtenidos. En primer lugar en pruebas como Nanoindentación, DRX y SEM-EDS solo se realizaron pruebas a ciertos especímenes con dosificaciones y periodos de curados lo que limita la interpretación de los resultados con dosificaciones más altas y periodos de curados más extensos. Además la metodología utilizada para el labrado de las muestras solo se presentó para un contenido de humedad; si bien es correcto determinar diferentes contenidos de humedad ya que al aplicar este proceso de estabilización de suelo en campo se llegan a presentar distintos contenidos de humedad, según las estaciones del año del sitio a estudiar. Otro factor limitante radica en la variabilidad en las condiciones ambientales durante los experimentos, como la temperatura y la humedad, las cuales no fueron controladas de manera estricta, lo que podría haber afectado la consistencia de las mediciones de compactibilidad y resistencia de los suelos. Finalmente, el uso de un solo tipo de aditivo enzimático también limita la interpretación de los efectos de diferentes concentraciones de aditivos sobre la resistencia a compresión del suelo, lo que podría haber influido en la magnitud de las mejoras observadas.

#### **4.11. Comparativa de métodos de estabilización de suelos con enzimas, cal y cemento**

La estabilización con enzimas es una opción eficiente y de fácil aplicación para la estabilización de suelos. Este método ofrece una ventaja a la hora de su adición al suelo, debido a que se realiza a través de una disolución acuosa que se puede mezclar fácilmente en tanques o directamente en un camión pipa y se distribuye homogéneamente sobre el suelo con alguna maquinaria niveladora. Resulta especialmente eficaz en suelos con un contenido de finos superior al 30 %, logrando una mejora en la resistencia a la compresión y compactibilidad en un plazo de 15 días. Sin embargo, después de los 30 días, las mejoras adicionales en la estabilidad tienden a ser mínimas, Naagesh S. et al. [92] realizaron un estudio a los 120 días y demostraron que los resultados principales se encontraban en un rango de tiempo de 15 a 30 días. En cuanto a la dosificación óptima para el tipo de suelo aplicado en esta investigación, se recomienda aplicar un 2 % del contenido de humedad del suelo, lo que equivale a aproximadamente un 33 % de la masa del suelo. Haciendo referencia a la resistencia a la compresión, los suelos arcillosos tratados con enzimas pueden alcanzar mejoras de hasta un 108 % en su capacidad de carga, dependiendo de otras condiciones y características del suelo.

Por otro lado, la estabilización con cal emplea cal hidratada, la cual reacciona con la humedad del suelo, mejorando su cohesión. Este proceso es más laborioso, ya que requiere grandes cantidades de cal y el uso de equipos pesados para mezclarla adecuadamente con el suelo, asegurando una distribución homogénea. Además, la cal no es eficiente en suelos ácidos, ya que su efectividad depende de un pH óptimo cercano a 12.4 [93]. Este método se utiliza principalmente en suelos finos y requiere una dosis aproximada de 1 % de cal por cada 10 % de arcilla presente en el suelo. La estabilización con cal puede tardar entre 14 y 28 días en alcanzar su máximo potencial, dependiendo del tipo de suelo y las condiciones ambientales. En cuanto a resistencia a la compresión, la estabilización con cal puede incrementar la resistencia en un 50 - 250 %, aunque este valor varía considerablemente con las características del suelo tratado [94].

Finalmente, la estabilización con cemento es efectiva para proporcionar una resistencia rápida, pero presenta desafíos en su aplicación. El cemento tiende a formar grumos cuando se mezcla con suelos arcillosos o con alta materia orgánica, lo que dificulta la distribución uniforme y requiere técnicas de mezcla más específicas, esta técnica se recomienda utilizarla principalmente en suelos arenosos. Este método presenta un rango de dosificación de entre 3 % y 16 % de cemento en masa, dependiendo del tipo de suelo, contenido de arcilla y materia orgánica [94]. La principal ventaja de este método es su rápida ganancia de resistencia en los primeros 7 días, con incrementos significativos en la capacidad de carga en este período inicial. En términos de resistencia a la compresión, los suelos estabilizados con cemento pueden ver aumentos de hasta un 300 % en comparación con su estado original, aunque este aumento puede verse afectado por la presencia de arcilla o materia orgánica en el suelo [95].

Cada método de estabilización presenta ventajas y desventajas dependiendo de las características del suelo a tratar, es por eso que es de suma importancia realizar estudios para caracterizar las arcillas e identificar la metodología más adecuada.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

La estabilización química del suelo se implementa ampliamente para mitigar los efectos adversos de las condiciones desfavorables del suelo y de las estructuras construidas sobre él. Sin embargo, los métodos convencionales de mejora del suelo suelen requerir un alto consumo de energía.

Se realizó un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas, microestructurales y morfológicas de una arcilla con y sin estabilización enzimática, cuyas conclusiones están respaldadas por los datos y resultados obtenidos:

- El análisis de imagen resultó ser una técnica útil para relacionar el acomodo y la distribución de las partículas del suelo, permitiendo obtener información cualitativa sobre la porosidad del suelo y su morfología, además el uso del parámetro de entropía proporcionó una comprensión más precisa de la relación de vacíos en el suelo.
- El mecanismo de estabilización enzimática actúa formando una película aglutinante sobre las partículas de arcilla, promoviendo floculaciones más finas que llenan los microporos del suelo. Esto mejora la uniformidad y compactación del material, incrementando las propiedades de cohesión, lo que favorece la estabilidad estructural del suelo.
- La técnica de nanoindentación mostró ser eficaz para determinar la dureza y el módulo de elasticidad superficial de las arcillas. Además, se comprobó que la adición de un aditivo enzimático a la matriz del suelo en estado seco mejora ambas propiedades.
- El análisis mineralógico reveló la presencia de minerales como albita, calcita, montmorillonita, cuarzo e ilita, con una notable reducción en el tamaño de los cristales, excepto en el caso de la montmorillonita, que mostró un aumento del 13 % en el suelo E2. Aunque durante la estabilización no se observaron la formación de nuevos minerales, sí se evidenció una buena adhesión entre las moléculas de silicio del suelo y los grupos CH de las enzimas.

- Los resultados señalaron que el porcentaje de aditivo enzimático más efectivo para esta investigación fue del 2 % con un periodo de curado de 15 días. En este caso presentó una capacidad de carga de 2 veces mayor a la del suelo sin tratamiento enzimático, por lo que podría reducir el dimensionamiento y costo de cimentaciones superficiales como las zapatas aisladas.
- La extensión del periodo de curado para la metodología aplicada, favoreció las condiciones óptimas para el crecimiento de hongos en los suelos estabilizados con dosificaciones más elevadas (4 y 8 %).
- La incorporación del aditivo enzimático en el suelo empleado en esta investigación generó una modificación microestructural y morfológica que resultó en un aumento de diversas propiedades mecánicas, como la compactibilidad y la resistencia a compresión.

Estos resultados no solo enriquecen el entendimiento del comportamiento del suelo, sino que también respaldan la aplicación de esta técnica de estabilización enzimática como una alternativa viable a las estabilizaciones que incorporan cemento y cal como materiales tradicionales. La implementación de esta estabilización enzimática podría ser particularmente adecuada para el diseño y construcción de cimentaciones superficiales, ya que permite utilizar dimensiones más reducidas mientras se logra una capacidad de carga similar mediante el uso de enzimas en bajas dosificaciones.

Para su implementación en el campo, es fundamental considerar los resultados obtenidos a partir de pruebas de resistencia a la compresión con distintas dosificaciones de enzimas, con el fin de optimizar su aplicación práctica.

## **5.2. Recomendaciones**

En el presente capítulo se presentan las recomendaciones clave derivadas de la investigación realizada sobre la estabilización de suelos con enzimas. Estas recomendaciones se fundamentan en los hallazgos y análisis obtenidos durante el estudio, destacando áreas críticas que requieren atención adicional para optimizar y expandir el uso de la estabilización enzimática en la ingeniería geotécnica:

- Se requieren pruebas adicionales con una metodología que mitigue la proliferación excesiva de hongos.
- Es crucial investigar en futuros estudios el comportamiento de expansión y consolidación ante fluctuaciones de humedad, además de analizar parámetros de permeabilidad, dado que el suelo experimenta ciclos constantes de absorción y expulsión de agua, lo que podría afectar el rendimiento de la estabilización.
- Se recomienda incluir pruebas para medir el potencial de hidrógeno y evaluar la toxicidad que el suelo podría presentar al añadir este tipo de estabilizador enzimático.
- También sería beneficioso considerar la implementación de suelos con configuraciones mineralógicas distintas a las investigadas, lo cual ampliaría su campo de aplicación y permitiría explorar nuevas posibilidades.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Censos y Conteos de Población y Vivienda.” Accessed: Aug. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- [2] C. M. Swanepoel, M. van der Laan, H. L. Weepener, C. C. du Preez, and J. G. Annandale, “Review and meta-analysis of organic matter in cultivated soils in southern Africa,” *Nutr Cycl Agroecosyst*, vol. 104, no. 2, pp. 107–123, Mar. 2016, doi: 10.1007/s10705-016-9763-4.
- [3] A. Julca-Otiniano, L. Meneses-Florián, R. Blas-Sevillano, and S. Bello-Amez, “La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura,” *Idesia (Arica)*, vol. 24, no. 1, Apr. 2006, doi: 10.4067/S0718-34292006000100009.
- [4] T. Ghosh *et al.*, “Variation of porosity, pore size distribution and soil physical properties under conservation agriculture,” *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, vol. 90, no. 11, pp. 2051–2058, Dec. 2020, doi: 10.56093/ijas.v90i11.108558.
- [5] A. A. Firoozi, A. A. Firoozi, and M. S. Baghini, “A Review of Clayey Soils.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/312027428>
- [6] G. K. Kome, R. K. Enang, F. O. Tabi, and B. P. K. Yerima, “Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: A Review,” *Open Journal of Soil Science*, vol. 09, no. 09, pp. 155–188, 2019, doi: 10.4236/ojss.2019.99010.
- [7] J. Juárez-Badillo, *Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos*, McGraw-Hill. 2006. [Online]. Available: [www.freelibros.org](http://www.freelibros.org)
- [8] J. Pooni, F. Giustozzi, D. Robert, S. Setunge, and B. O'Donnell, “Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation,” *Transportation Geotechnics*, vol. 21, p. 100255, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100255>.
- [9] C. C. Ikeagwuani and D. C. Nwonu, “Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 423–440, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>.

- [10] T. Orozco-Ruiz and R. Nava-Castro, "Química de las Arcillas Marinas Expansivas en Ambientes Marinos Ultraprofundos, Golfo de México," Mérida, Yucatán, 2016.
- [11] Secretaría de Comunicación y Transporte, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones," Ciudad de México, 2023.
- [12] P. Ghadir and N. Ranjbar, "Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement," *Constr Build Mater*, vol. 188, pp. 361–371, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>.
- [13] U. Zada *et al.*, "Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: current challenges and opportunities," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01985.
- [14] D. Barman and S. K. Dash, "Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 1319–1342, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.011.
- [15] P. V. Kolhe and A. I. Dhattrak, "Unconfined compressive strength of bio-enzymatic treated expansive (BC) soil," *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 6809–6813, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.946.
- [16] J. Ramírez-Ramírez and M. Ayala-Aceves, "Enzimas: ¿Qué son y cómo funcionan?," *revista digital universitaria UNAM*, vol. 15, p. 12, 2014, [Online]. Available: <http://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art91/#>
- [17] P. K. Robinson, "Enzymes: principles and biotechnological applications," *Essays Biochem*, vol. 59, pp. 1–41, Nov. 2015, doi: 10.1042/bse0590001.
- [18] A. Hasanbeigi, C. Menke, and L. Price, "The CO<sub>2</sub> abatement cost curve for the Thailand cement industry," *J Clean Prod*, vol. 18, no. 15, pp. 1509–1518, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.06.005.
- [19] N. A. Odeh and A. H. J. Al-Rkaby, "Strength, Durability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, p. e00988, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00988>.

- [20] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, and A. Bahadori, "Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry," *J Clean Prod*, vol. 51, pp. 142–161, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- [21] Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, "Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio.," 2010. [Online]. Available: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>;
- [22] N. Mohamad, K. Muthusamy, R. Embong, A. Kusbiantoro, and M. H. Hashim, "Environmental impact of cement production and Solutions: A review," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 741–746. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.212.
- [23] P. V. Kolhe and A. I. Dhattrak, "Unconfined compressive strength of bio-enzymatic treated expansive (BC) soil," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2022, pp. 6809–6813. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.946.
- [24] J. F. Rivera, A. Aguirre-Guerrero, R. Mejía de Gutiérrez, and A. Orobio, "Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)," *Informador Técnico*, vol. 84, no. 2, pp. 202–226, May 2020, doi: 10.23850/22565035.2530.
- [25] M. Al-Mukhtar, S. Khattab, and J.-F. Alcover, "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil," *Eng Geol*, vol. 139–140, pp. 17–27, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>.
- [26] Manuel. Pozo-Rodríguez, J. González-Yélamos, and J. Giner-Robles, *Geología práctica : introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas*, Eighth. 2004.
- [27] D. Braja M., *Advanced Soil Mechanics*, Fifth Edition. 2019.
- [28] T. W. Lambe and R. V. Witman, *Mecánica de suelos*, Primera Edición. 2012.
- [29] D. E. Sinarahua Alarcon and C. R. Tafur Jimenez, "Evaluación de aditivos Perma zyme 30x y Conaid," Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo , Chiclayo, 2021.

- [30] American Society for Testing and Materials, "D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils," 2007.
- [31] B. Arredondo-Tamayo *et al.*, "Study of gellan gum films reinforced with eggshell nanoparticles for the elaboration of eco-friendly packaging," *Food Structure*, vol. 34, p. 100297, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.foostr.2022.100297.
- [32] C. Escobar-Duque and P. Gonzalo, *Geomecánica.*, Segunda Edición. 2016.
- [33] American Society for Testing and Materials, "D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Standard Effort," 2012.
- [34] American Society for Testing and Materials, "D7481 Standard Test Methods for Determining Loose and Tapped Bulk Densities of Powders using a Graduated Cylinder 1," 2018.
- [35] E. L. Aksakal, I. Angin, and T. Oztas, "Effects of diatomite on soil consistency limits and soil compactibility," *Catena (Amst)*, vol. 101, pp. 157–163, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.catena.2012.09.001.
- [36] E. E. Neri-Torres *et al.*, "Structural and physicochemical characterization of spirulina (*Arthrospira maxima*) nanoparticles by high-resolution electron microscopic techniques," *Microscopy and Microanalysis*, vol. 22, no. 4, pp. 887–901, Aug. 2016, doi: 10.1017/S1431927616011442.
- [37] American Society for Testing and Materials, "D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," 2018.
- [38] American Society for Testing and Materials, "D2487-11 Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos) 1," 2011.
- [39] J. Huang, R. B. Kogbara, N. Hariharan, E. A. Masad, and D. N. Little, "A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization," *Constr Build Mater*, vol. 305, p. 124685, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124685.
- [40] American Society for Testing and Materials, "D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil," 2016.
- [41] W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing

- indentation experiments,” *J Mater Res*, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583, Jun. 1992, doi: 10.1557/jmr.1992.1564.
- [42] D. Brandon and W. D. Kaplan, *Microstructural Characterization of Materials*, Second Edition. 2008.
- [43] W. D. Callister-Jr. and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, Second Edition. Editorial Reverté, 2015.
- [44] H. C. Chun, D. Giménez, and S. W. Yoon, “Morphology, lacunarity and entropy of intra-aggregate pores: Aggregate size and soil management effects,” *Geoderma*, vol. 146, no. 1–2, pp. 83–93, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.geoderma.2008.05.018.
- [45] J. D. Hernández-Varela, J. J. Chanona-Pérez, H. A. Calderón-Benavides, F. Cervantes Sodi, and M. Vicente-Flores, “Effect of ball milling on cellulose nanoparticles structure obtained from garlic and agave waste,” *Carbohydr Polym*, vol. 255, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117347.
- [46] C. W. Oatley, “The early history of the scanning electron microscope,” *J Appl Phys*, vol. 53, no. 2, 1982, doi: 10.1063/1.331666.
- [47] S. D. Gallegos-Cerda, J. D. Hernández-Varela, B. Arredondo-Tamayo, and J. J. Chanona-Pérez, “A review of advanced microscopy techniques for the development of nanotechnology in agriculture, food, and the environment,” *Mundo Nano*, vol. 16, no. 30, pp. 1e–33e, Aug. 2022, doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69723.
- [48] D. I. Hidalgo-Benavides and V. Almeida, “Análisis comparativo de los procesos de estabilización de suelo con enzima orgánicas y suelo-cemento, aplicado a suelos arcillosos de sub-rasante.” Facultad de ingeniería civil y mecánica carrera de ingeniería civil, Ambato, Ecuador , 2016.
- [49] P. Kumar-Vaddi, S. Dey, C. N. Bharath, and U. Pallavi, “Effects of Bio-enzyme on the strength properties of soil,” *Chemistry of Inorganic Materials*, vol. 3, p. 100047, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.cinorg.2024.100047.
- [50] M. E. Al-Atroush and T. A. Sebaey, “Stabilization of expansive soil using hydrophobic polyurethane foam: A review,” *Transportation Geotechnics*, vol. 27, p. 100494, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100494>.

- [51] S. S. Kushwaha, D. Kishan, and N. Dindorkar, "Stabilization of Expansive Soil Using Eko Soil Enzyme For Highway Embankment," *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 9, Part 3, pp. 19667–19679, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.329>.
- [52] M. O. Marasteanu, H. T. Clyne-Ray, and R. Velasquez, "Preliminary laboratory investigation of enzyme solutions as a soil stabilizer," University of Minnesota, Minneapolis, 2005. [Online]. Available: <http://www.lrrb.org/PDF/200525.pdf>
- [53] J. Pooni, F. Giustozzi, D. Robert, S. Setunge, and B. O'Donnell, "Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation," Dec. 01, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.trgeo.2019.100255.
- [54] P. Agarwal and S. Kaur, "Effect of bio-enzyme stabilization on unconfined compressive strength of expansive soil," *Int J Res Eng Technol*, vol. 03, no. 05, pp. 30–33, May 2014, doi: 10.15623/ijret.2014.0305007.
- [55] A. AbouKhadra, A. F. Zidan, and Y. Gaber, "Experimental evaluation of strength characteristics of different Egyptian soils using enzymatic stabilizers," *Cogent Eng*, vol. 5, no. 1, 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1517577.
- [56] E. Mengue, H. Mroueh, L. Lancelot, and R. Medjo-Eko, "Physicochemical and consolidation properties of compacted lateritic soil treated with cement," *Soils and Foundations*, vol. 57, no. 1, pp. 60–79, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.sandf.2017.01.005.
- [57] A. Rodríguez, M. Ortiz, J. Thomas, and A. Visintin, "Electrochemical performance evaluation of a Ni/Fe mixed oxide natural clay composite as anode material for Li-ion batteries," *Electrochim Acta*, vol. 479, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.electacta.2024.143869.
- [58] D. Allaoui *et al.*, "Valorization of ceramic sanitary waste into Resilient phosphoric acid-based geopolymers for sustainable construction: Thermal, mechanical, and microstructural properties," *Ceram Int*, vol. 50, no. 6, pp. 8875–8889, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.12.203.

- [59] A. Bazarbekova, S. R. Naik, Y. R. Kim, D. Little, J. S. Jung, and Y. B. Park, "One-part alkali-activated soil stabilization with sodium metasilicate: Mechanical-geochemical-mineralogical characterization," *Transportation Geotechnics*, vol. 44, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.trgeo.2023.101163.
- [60] V. Isel-Cáceres, A. L. Chaparro-García, and J. Sánchez-Molina, *Caracterización de materiales arcillosos y su potencial aplicación en la industria cerámica.*, Primera Edición. 2021.
- [61] P. S. Nayak and B. K. Singh, "Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR," India , 2007.
- [62] D. Hou, G. Zhang, R. R. Pant, J. S. Shen, M. Liu, and H. Luo, "Nanoindentation characterization of a Ternary clay-based composite used in ancient chinese construction," *Materials*, vol. 9, no. 11, Nov. 2016, doi: 10.3390/ma9110866.
- [63] J. A. Baldovino, Y. E. Núñez de la Rosa, and O. P. Calabokis, "Insight on characterization through porosity-to-lime index of a stabilized soil for the long-term," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02718.
- [64] American Society for Testing and Materials, "C702/C702M-18. Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size," 2018.
- [65] R. D. Oyola-Guzmán and L. S. Vaca-Oyola, "Uso de la teoría de Mohr-Coulomb para explicar el mejoramiento de suelos mediante procesos de compactación," *Arquitectura e Ingeniería*, vol. 12, no. 1, pp. 1990–8830, 2018, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193959645004>
- [66] A. P. Bathija and M. Prasad, "Elastic properties of clay," Faculty of the Colorado School of Mines , Golden, Colorado , 2009.
- [67] S. Kadali, S. Sharma, and D. N. Singh, "Application of nanoindentation to establish influence of heat on soils," *Eng Geol*, vol. 162, pp. 14–21, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.05.004.

- [68] A. Paliwal, N. Sharma, and A. M. Mohite, "Effect of wet processing on the grinding characteristics and functional properties of sorghum," *Applied Food Research*, vol. 3, no. 1, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.afres.2022.100255.
- [69] V. E. Fabre, M. B. Bizzotto, and J. C. Tirner, "Comportamiento resistente de suelos orgánicos estabilizados con tanino," *Informacion Tecnologica*, vol. 21, no. 2, pp. 103–112, 2010, doi: 10.1612/inf.tecnol.4147it.08.
- [70] D. R. Gambill, W. A. Wall, A. J. Fulton, and H. R. Howard, "Predicting USCS soil classification from soil property variables using Random Forest," *J Terramech*, vol. 65, pp. 85–92, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jterra.2016.03.006.
- [71] K. A. Smith and C. E. Mullins, *Soil and environmental analysis : physical methods*, Second Edition. M. Dekker, 2001.
- [72] A. Casagrande, "Classification and identification of soils," *American Society of Civil Engineers Transactions*, vol. 113, 1948.
- [73] A. Soltani, M. Azimi, and B. C. O'Kelly, "Reappraisal of linear shrinkage test for plasticity index determination and classification of fine-grained soils," Jun. 15, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.clay.2023.106920.
- [74] X. Chu, A. Dawson, N. Thom, H. Chen, and L. Qin, "Permanent deformation characteristics of unsaturated subgrade soils under cyclic loading," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03099.
- [75] I. Yakimets, S. S. Paes, N. Wellner, A. C. Smith, R. H. Wilson, and J. R. Mitchell, "Effect of water content on the structural reorganization and elastic properties of biopolymer films: A comparative study," *Biomacromolecules*, vol. 8, no. 5, pp. 1710–1722, May 2007, doi: 10.1021/bm070050x.
- [76] S.-M. Ham, I. Chang, D.-H. Noh, T.-H. Kwon, and B. Muhunthan, "Improvement of Surface Erosion Resistance of Sand by Microbial Biopolymer Formation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 144, no. 7, Jul. 2018, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001900.
- [77] Z. Ma, R. Pathegama-Gamage, and C. Zhang, "Application of nanoindentation technology in rocks: a review," Dec. 01, 2020, *Springer*

*Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s40948-020-00178-6.

- [78] C. Auvray, N. Lafrance, and D. Bartier, "Elastic modulus of claystone evaluated by nano-/micro-indentation tests and meso-compression tests," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 84–91, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jrmge.2016.02.002.
- [79] P. Pagès, "Characterization of polymer materials using FT-IR and DSC techniques," Colombia., 2005.
- [80] A. Ramírez-Hernández, C. Aguilar-Flores, and A. Aparicio-Saguilán, "Fingerprint analysis of ftir spectra of polymers containing vinyl acetate," *DYNA (Colombia)*, vol. 86, no. 209, pp. 198–205, Apr. 2019, doi: 10.15446/dyna.v86n209.77513.
- [81] D. Q. Tham, N. T. T. Trang, N. T. Chinh, N. V. Giang, T. D. Lam, and T. Hoang, "Sustainable composite materials based on ethylene-vinylacetate copolymer and organo-modified silica," *Green Processing and Synthesis*, vol. 5, no. 6, pp. 557–566, Dec. 2016, doi: 10.1515/gps-2016-0044.
- [82] J. Madejová, "FTIR techniques in clay mineral studies," *Vib Spectrosc*, vol. 31, pp. 1–10, 2003, Accessed: Aug. 13, 2024. [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/vibspec](http://www.elsevier.com/locate/vibspec)
- [83] G. Jozanikohan and M. N. Abarghooei, "The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis for the clay mineralogy studies in a clastic reservoir," *J Pet Explor Prod Technol*, vol. 12, no. 8, pp. 2093–2106, Aug. 2022, doi: 10.1007/s13202-021-01449-y.
- [84] T. J. Gutiérrez, A. G. Ponce, and V. A. Alvarez, "Nano-clays from natural and modified montmorillonite with and without added blueberry extract for active and intelligent food nanopackaging materials," *Mater Chem Phys*, vol. 194, pp. 283–292, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.03.052.
- [85] A. Eisazadeh, K. A. Kassim, and H. Nur, "Characterization of phosphoric acid- and lime-stabilized tropical lateritic clay," *Environ Earth Sci*, vol. 63, no. 5, pp. 1057–1066, Jul. 2011, doi: 10.1007/s12665-010-0781-2.

- [86] Y. Luan, X. Ma, Y. Ma, X. Liu, S. Jiang, and J. Zhang, "Research on strength improvement and stabilization mechanism of organic polymer stabilizer for clay soil of subgrade," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02397.
- [87] C. L. G. Amorim *et al.*, "Effect of clay-water interactions on clay swelling by X-ray diffraction," *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, vol. 580, no. 1 SPEC. ISS., pp. 768–770, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.nima.2007.05.103.
- [88] R. D. Holtz, W. D. Kovacs, and T. C. Sheahan, *An introduction to geotechnical engineering*, Second Edition. Pearson, 2011.
- [89] P. Krejci, T. Gimmi, L. R. Van-Loon, and M. Glaus, "Relevance of diffuse-layer, Stern-layer and interlayers for diffusion in clays: A new model and its application to Na, Sr, and Cs data in bentonite," *Appl Clay Sci*, vol. 244, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.clay.2023.107086.
- [90] T. Ohkubo, A. Yamazaki, Y. Fukatsu, and Y. Tachi, "Pore distribution of compacted Ca-montmorillonite using NMR relaxometry and cryoporometry: Comparison with Na-montmorillonite," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 313, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.micromeso.2020.110841.
- [91] A. H. Rodríguez-Alcalde and M. A. Mosqueira-Moreno, "Análisis comparativo del diseño de zapatas aisladas y combinadas rectangulares por flexión uniaxial y biaxial con programa computacional elaborado y safe," Cajamarca, 2015.
- [92] S. Naagesh and S. Gangadhara, "Swelling behaviour of bio-enzyme treated expansive soil," *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 4, pp. 555–560, Jun. 2011.
- [93] C. D. F. Rogers and S. Glendinning, "Lime Requirement for Stabilization.," *Transp Res Rec*, vol. 1721, no. 1, pp. 9–18, 2000.
- [94] D. Barman and S. K. Dash, "Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review," Aug. 01, 2022, *Chinese Academy of Sciences*. doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.011.
- [95] S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon, and A. Suddeepong, "Analysis of strength development in cement-stabilized silty

clay from microstructural considerations,” *Constr Build Mater*, vol. 24, no. 10, pp. 2011–2021, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011.

- [96] Google Earth, “Mapa del sector norte de Culiacán, Sinaloa,” Google Earth . Accessed: Dec. 11, 2024. [Online]. Available: <https://earth.google.com/web/@24.83926742,-107.46618894,52.612993a>

## 7. ANEXOS

PROCTOR MODIFICADO										
Obra	Investigación MIC				Fecha moldeo	05/06/2023				
Ubicación	Stanza Granada				Sondeo	PCA-1				
Nombre de la muestra	SR-00-00				Profundidad	2 metros.				
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima									
ESPECIFICACIONES DE LA PRUEBA										
Número de Golpes	25	Peso del Martillo			Peso del Molde			4,180	gr	
Número de Capas	3	Volumen del Molde (cm <sup>3</sup> )			945.1			Diámetro del Molde	10.15	cm
Altura de caída					Altura del Molde			11.68	cm	
PROCESO DE COMPACTACIÓN										
Ensayo Número	1	2	3	4	5					
Humedad inicial añadida en %										
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	5610	5660	5860	5780	5730					
Peso Suelo Húmedo W <sub>m</sub> (gr)	1,430	1,480	1,680	1,600	1,550					
Peso Unitario Húmedo γ <sub>m</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	1.513	1.566	1.778	1.693	1.640					
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD										
Número de Recipiente	F-C	F-C	W-2	W-2	F-1	F-1	H-9'2	H-9'2	B-4	B-4
Peso del Recipiente (W <sub>r</sub> )	40.2		37.9		31.4		41.1		34.7	
Rec. + Suelo Húmedo (W <sub>r</sub> + W <sub>m</sub> )	119.3		137.6		99.7		148.3		107.8	
Rec. + Suelo Seco (W <sub>r</sub> + W <sub>s</sub> )	106.6		120.4		82.9		115.8		83.6	
peso Sólido (W <sub>s</sub> )	66.4		82.5		51.5		74.7		48.9	
Peso del Agua (W <sub>w</sub> )	12.7		17.2		16.8		32.5		24.2	
Cont. de Humedad (w%)	19%		21%		33%		44%		49%	
Contenido de Humedad Prom. (W%)	19%		21%		33%		44%		49%	
Peso Volumétrico Seco γ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	1.270		1.296		1.340		1.180		1.097	

Figura 26. Prueba Proctor Modificado en el suelo C.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-00-00-R1								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

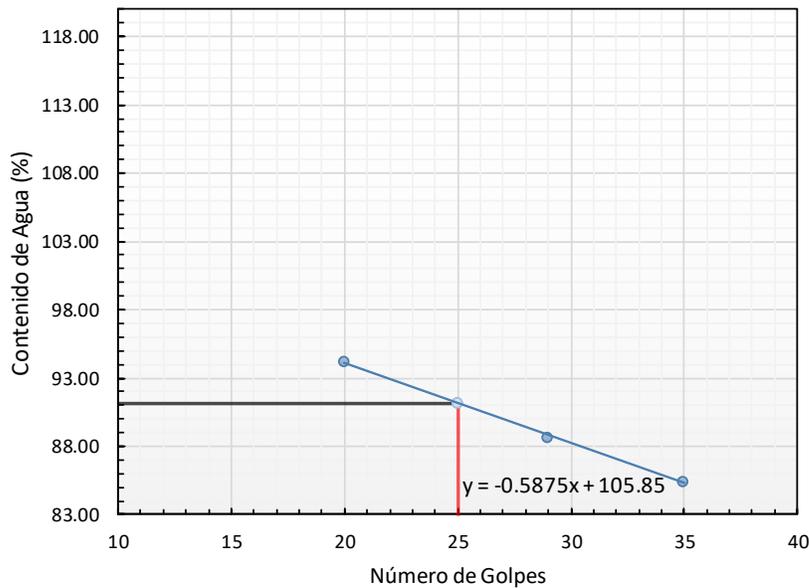
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z-7	20	86.04	61.08	24.96	34.58	26.5	94.19
2	SD-5	29	79.34	57.61	21.73	33.09	24.52	88.61
3	CC-4	35	66.19	51.43	14.76	34.15	17.28	85.42

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	R-2		20.28	18.01	2.27	12.46	5.55	40.92
2	3-G		21.25	18.86	2.39	12.82	6.04	39.52
PROMEDIO								40.22

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 91.17 %

LP= 40.22 %

IP= 50.95 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 27. Prueba de límites de Atterberg para C repetición 1.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-00-00-R2								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m	
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

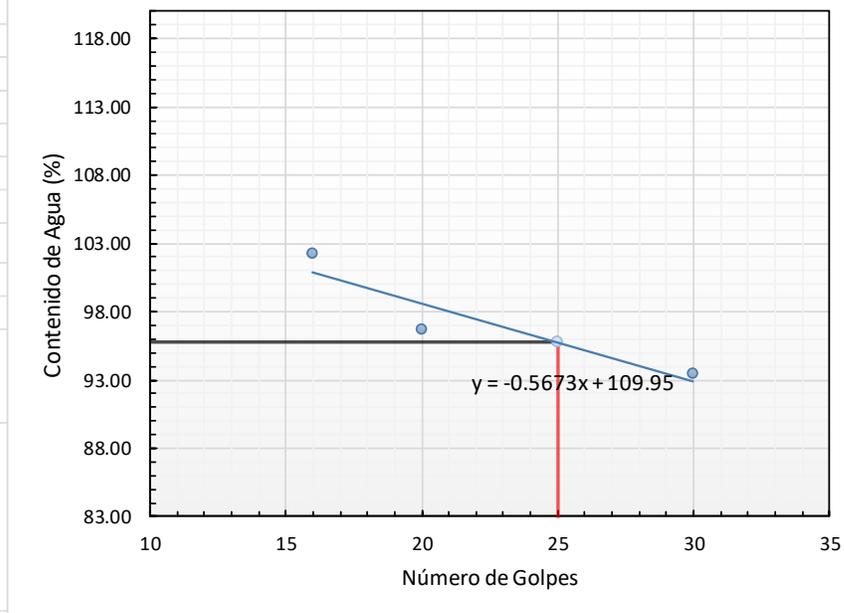
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	170	16	61.76	49.46	12.30	37.43	12.03	102.26
2	78V	20	58.99	47.51	11.48	35.63	11.88	96.68
3	165	30	59.77	48.02	11.75	35.45	12.57	93.49

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z		21.78	20.48	1.30	17.44	3.04	42.77
2	17Y		21.68	20.33	1.35	17.07	3.26	41.37
PROMEDIO								42.07

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 95.77 %

LP= 42.07 %

IP= 53.70 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 28. Prueba de límites de Atterberg para C repetición 2.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-00-00-R3								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

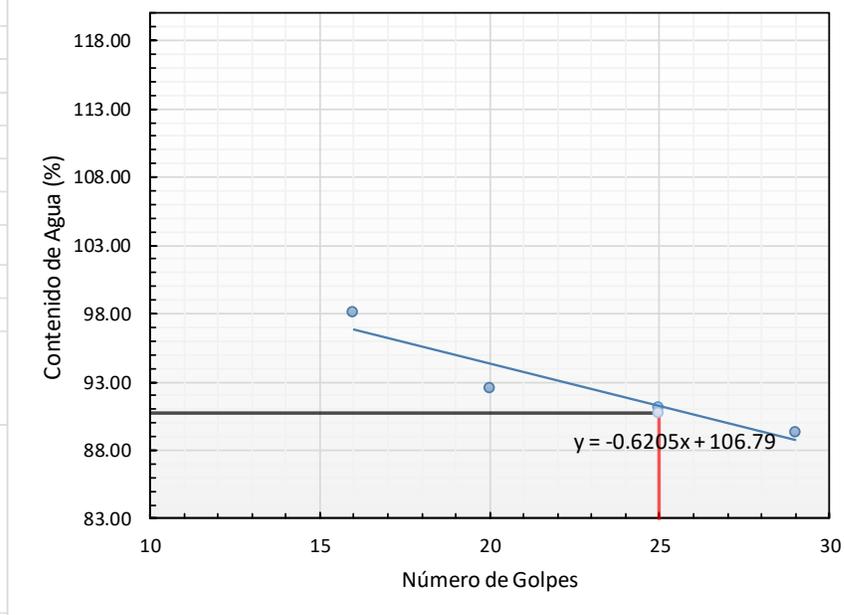
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	170	16	61.31	49.48	11.83	37.43	12.05	98.14
2	174	20	59.54	48.27	11.27	36.09	12.18	92.56
3	166	29	55.60	46.58	9.02	36.49	10.09	89.37

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	z		21.73	20.5	1.23	17.44	3.06	40.06
2	17Y		21.49	20.27	1.22	17.07	3.2	38.26
PROMEDIO								39.16

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 90.78 %  
 LP= 39.16 %  
 IP= 51.62 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 29. Prueba de límites de Atterberg para C repetición 3.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-02-15-EZ-R1								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

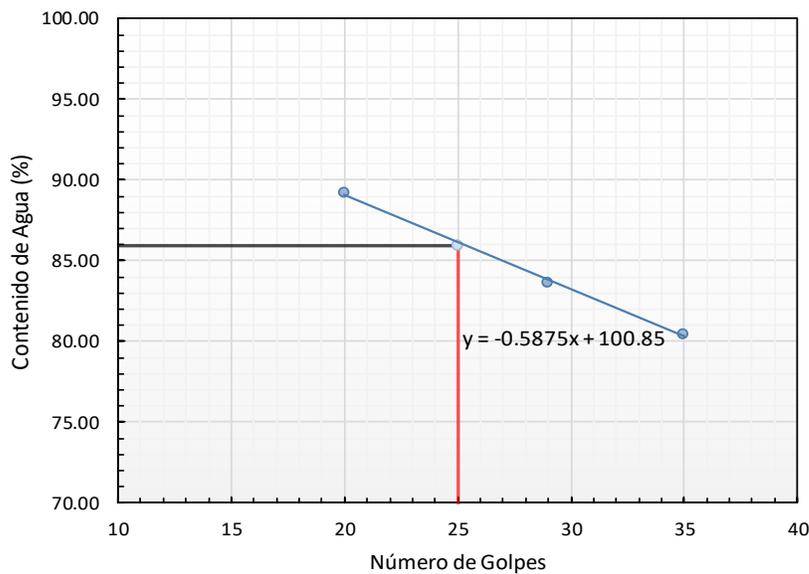
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z-7	20	82.75	60.04	22.71	34.58	25.46	89.19
2	SD-5	29	81.76	59.6	22.16	33.09	26.51	83.61
3	CC-4	35	100.67	71.02	29.65	34.15	36.87	80.42

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	R-2		25.14	21.4	3.74	12.46	8.94	41.89
2	3-G		26.42	22.5	3.92	12.82	9.68	40.49
PROMEDIO								41.19

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 85.94 %  
 LP= 41.19 %  
 IP= 44.75 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 30. Prueba de límites de Atterberg para E2-15 repetición 1.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada			Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo					
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-02-15-EZ-R2								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

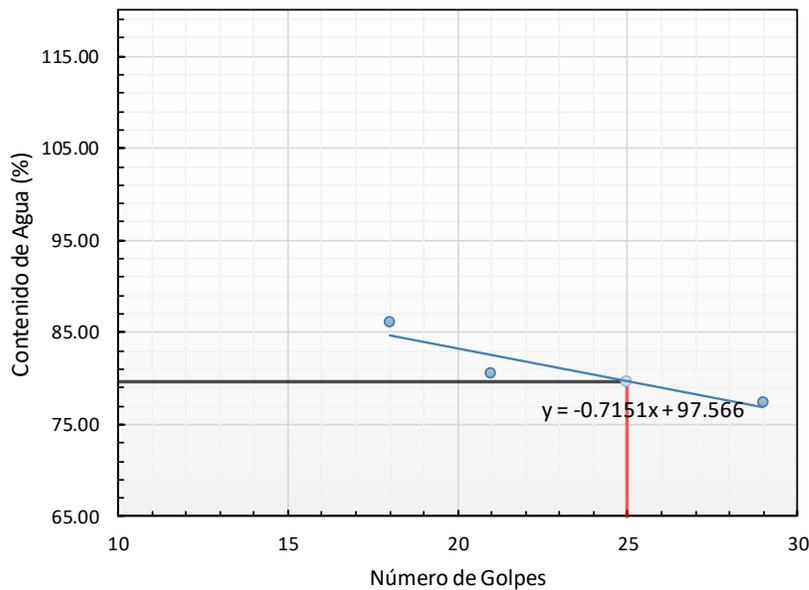
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	130	18	60.85	50.01	10.84	37.43	12.58	86.14
2	159Q	21	61.22	49.8	11.42	35.63	14.17	80.56
3	172	29	59.54	49.03	10.51	35.45	13.58	77.37

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z		28.24	27.01	1.23	17.44	3.04	40.34
2	17Y		30.67	29.4	1.27	17.07	3.26	38.94
PROMEDIO								39.64

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 79.65 %  
 LP= 39.64 %  
 IP= 40.01 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 31. Prueba de límites de Atterberg para E2-15 repetición 2.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-02-15-EZ-R3								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m	
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

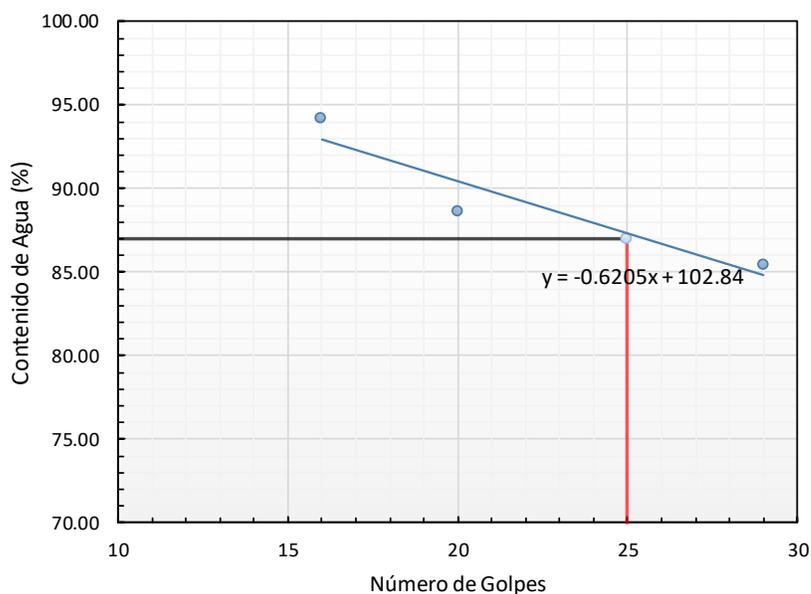
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	170	16	59.61	48.85	10.76	37.43	11.42	94.19
2	174	20	57.86	47.63	10.23	36.09	11.54	88.61
3	166	29	57.40	47.77	9.63	36.49	11.28	85.42

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	z		19.53	18.9	0.63	17.44	1.46	42.94
2	17Y		24.75	22.51	2.24	17.07	5.44	41.14
PROMEDIO								42.04

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 87.04 %

LP= 42.04 %

IP= 45.00 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 32. Prueba de límites de Atterberg para E2-15 repetición 3.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada			Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo					
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-04-15-EZ-R1								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

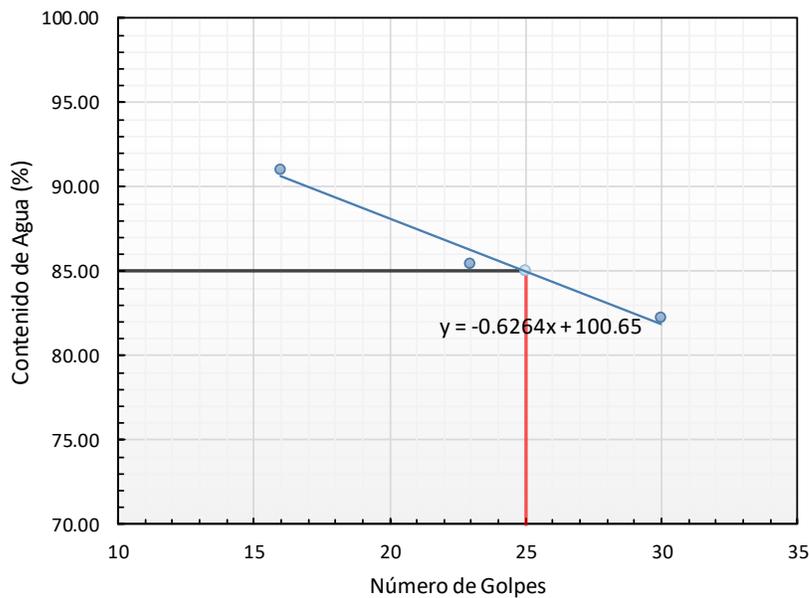
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	H-2	16	84.22	60.74	23.48	34.95	25.79	91.03
2	R-4D	23	89.53	65.96	23.57	38.38	27.58	85.45
3	W-2	30	95.32	69.34	25.98	37.76	31.58	82.26

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	3F		23.67	21.06	2.61	14.69	6.37	40.96
2	15O		24.33	21.05	3.28	12.77	8.28	39.56
PROMEDIO								40.26

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 85.02 %  
 LP= 40.26 %  
 IP= 44.76 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 33. Prueba de límites de Atterberg para E4-15 repetición 1.

			LÍMITES DE CONSISTENCIA		
			Obra: Stanza Granada	Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo	
			Localización: Culiacán, Sinaloa		
			Descripción: SR-04-15-EZ-R2		
			Fecha Moldeo: 28/11/2023	Sondeo: PCA-1	Prof.: 2.0 m
			Fecha Ensaye: 13/12/2023		

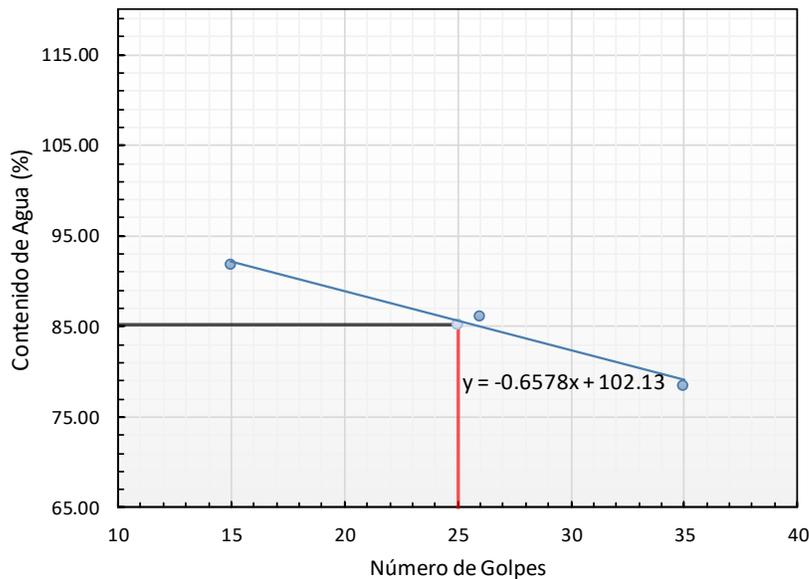
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	116.00	15	71.17	54.21	16.96	35.73	18.48	91.75
2	159.00	26	63.52	50.21	13.31	34.76	15.45	86.17
3	174.00	35	63.34	51.36	11.98	36.1	15.26	78.48

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	G		26.25	24.85	1.40	11.9	3.46	40.51
2	5.00		27.06	25.68	1.38	17.09	3.54	39.11
PROMEDIO								39.81

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 85.26 %  
 LP= 39.81 %  
 IP= 45.45 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 34. Prueba de límites de Atterberg para E4-15 repetición 2.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-04-15-EZ-R3								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

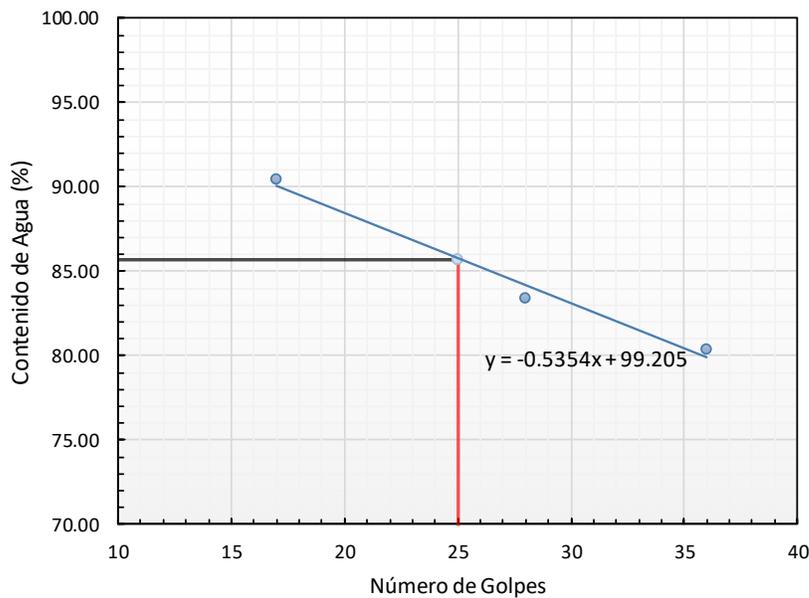
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	130	17	54.23	45.36	8.87	35.55	9.81	90.45
2	162	28	58.23	48.89	9.34	37.69	11.2	83.40
3	77	36	57.38	47.13	10.25	34.38	12.75	80.40

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	G		23.62	20.24	3.38	11.9	8.34	40.48
2	5.00		24.59	22.5	2.09	17.09	5.41	38.68
PROMEDIO								39.58

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 85.70 %  
 LP= 39.58 %  
 IP= 46.12 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 35. Prueba de límites de Atterberg para E4-15 repetición 3.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada			Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo					
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-08-15-EZ-R1								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

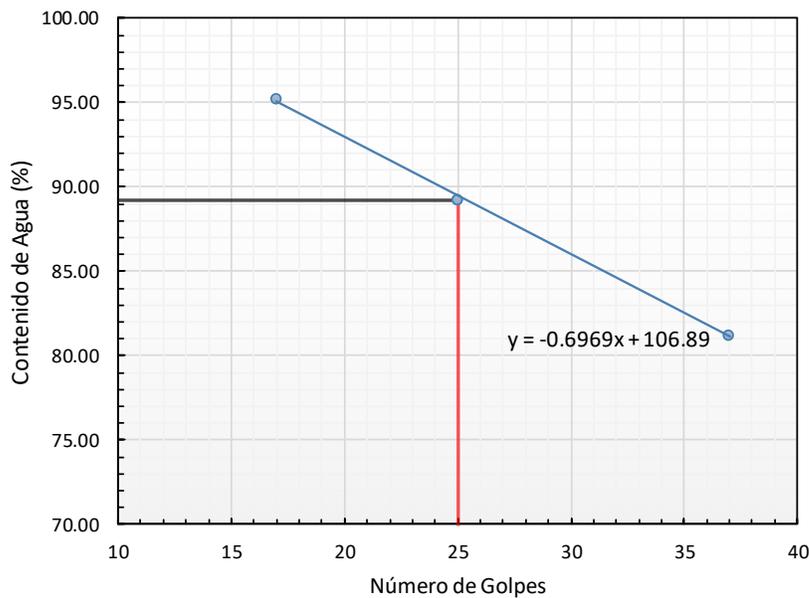
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z-7	17	76.98	56.3	20.68	34.58	21.72	95.20
2	H-2	25	83.05	60.37	22.68	34.95	25.42	89.21
3	W-2	37	96.29	70.06	26.23	37.76	32.3	81.21

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	R-2		18.73	16.92	1.81	12.46	4.46	40.50
2	3-G		18.97	17.24	1.73	12.82	4.42	39.10
PROMEDIO								39.80

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 89.21 %  
 LP= 39.80 %  
 IP= 49.41 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 36. Prueba de límites de Atterberg para E8-15 repetición 1.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-08-15-EZ-R2								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1		Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

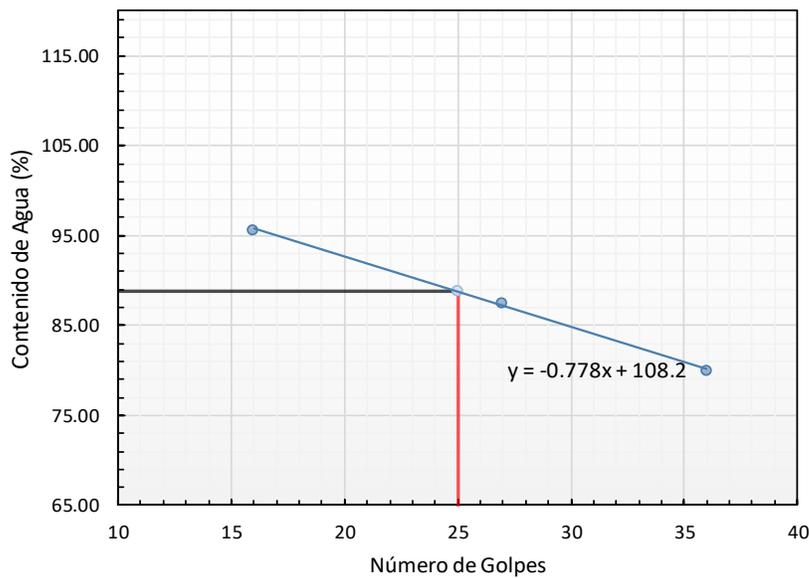
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	78.00	16	55.45	45.77	9.68	35.65	10.12	95.61
2	172.00	27	63.82	51.11	12.71	36.58	14.53	87.50
3	166.00	36	60.70	49.94	10.76	36.49	13.45	80.02

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	25		22.59	21.14	1.45	17.99	3.46	41.82
2	7.00		22.63	21.2	1.43	17.44	3.54	40.42
PROMEDIO								41.12

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 88.76 %

LP= 41.12 %

IP= 47.64 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 37. Prueba de límites de Atterberg para E8-15 repetición 2.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada			Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo					
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-08-15-EZ-R3								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

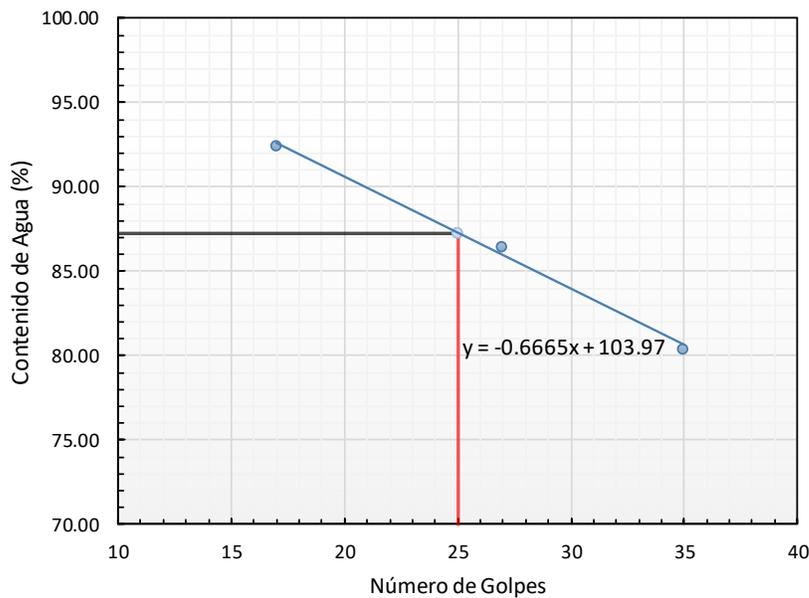
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	165	17	55.90	46.11	9.79	35.52	10.59	92.45
2	170	27	59.27	49.15	10.12	37.44	11.71	86.40
3	161	35	62.05	50.64	11.41	36.45	14.19	80.40

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	25		22.60	21.19	1.41	17.99	3.2	44.13
2	7.00		22.83	21.23	1.60	17.44	3.79	42.33
PROMEDIO								43.23

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 87.28 %  
 LP= 43.23 %  
 IP= 44.05 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 38. Prueba de límites de Atterberg para E8-15 repetición 3.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-02-30-EZ-R1								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m	
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

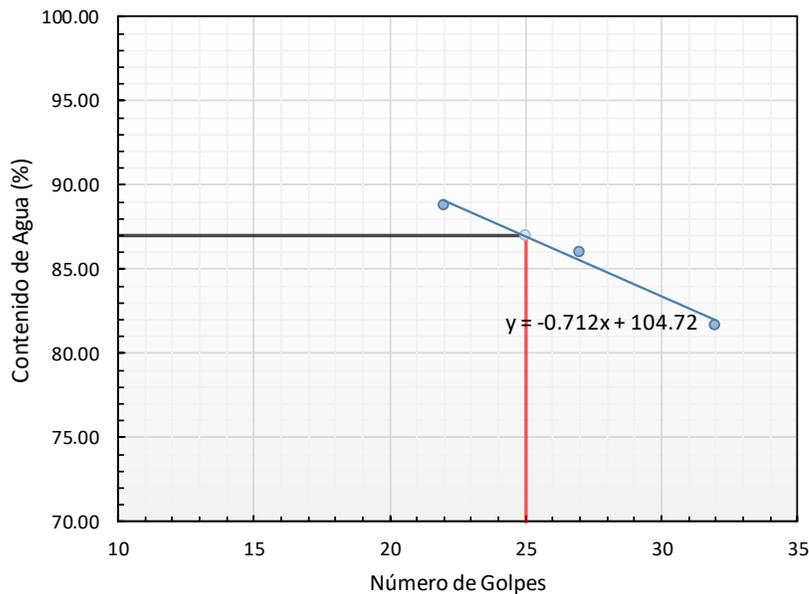
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z-7	22	73.57	55.23	18.34	34.58	20.65	88.79
2	SD-5	27	72.23	54.13	18.10	33.09	21.04	86.02
3	CC-4	32	80.39	59.6	20.79	34.15	25.45	81.67

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	R-2		22.99	19.84	3.15	12.46	7.38	42.62
2	3-G		25.25	21.62	3.63	12.82	8.8	41.22
PROMEDIO								41.92

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 87.04 %

LP= 41.92 %

IP= 45.12 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 39. Prueba de límites de Atterberg para E2-30 repetición 1.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-02-30-EZ-R2								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1		Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

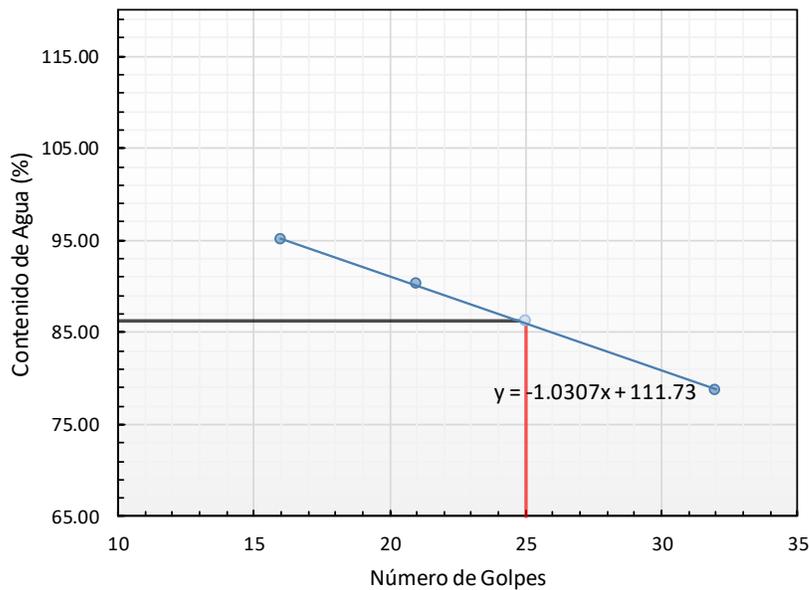
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	130	16	64.53	51.32	13.21	37.43	13.89	95.09
2	159Q	21	64.19	50.64	13.55	35.63	15.01	90.30
3	172	32	61.50	50.03	11.47	35.45	14.58	78.68

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z		26.89	25.62	1.27	17.44	3.04	41.75
2	17Y		27.86	26.54	1.32	17.07	3.26	40.35
PROMEDIO								41.05

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 86.25 %  
 LP= 41.05 %  
 IP= 45.20 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 40. Prueba de límites de Atterberg para E2-30 repetición 2.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-02-30-EZ-R3								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m	
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

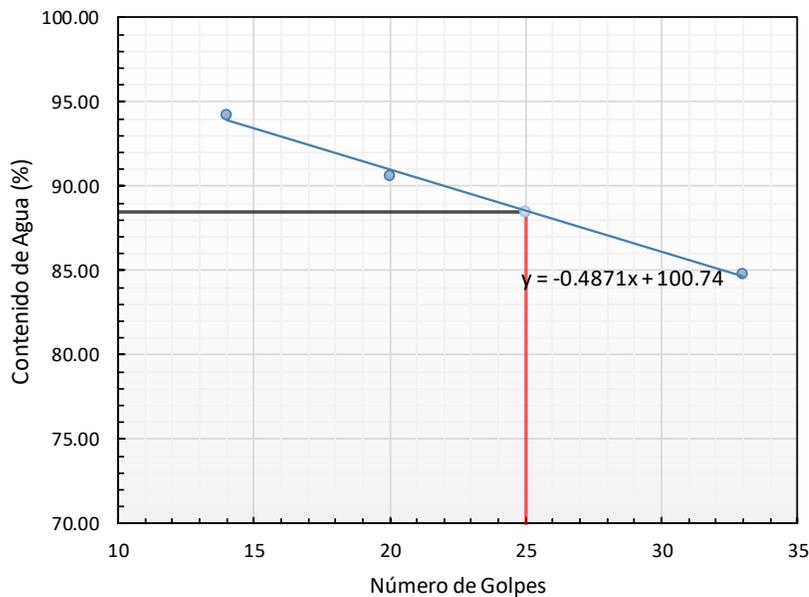
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	170	14	61.84	50	11.84	37.43	12.57	94.19
2	174	20	60.07	48.67	11.40	36.09	12.58	90.62
3	166	33	63.97	51.36	12.61	36.49	14.87	84.79

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	z		20.39	19.54	0.85	17.44	2.1	40.58
2	17Y		24.22	22.22	2.00	17.07	5.15	38.78
PROMEDIO								39.68

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 88.50 %

LP= 39.68 %

IP= 48.82 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 41. Prueba de límites de Atterberg para E2-30 repetición 3.

			LÍMITES DE CONSISTENCIA		
			Obra: Stanza Granada	Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo	
			Localización: Culiacán, Sinaloa		
			Descripción: SR-04-30-EZ-R1		
			Fecha Moldeo: 28/11/2023	Sondeo: PCA-1	Prof.: 2.0 m
			Fecha Ensaye: 13/12/2023		

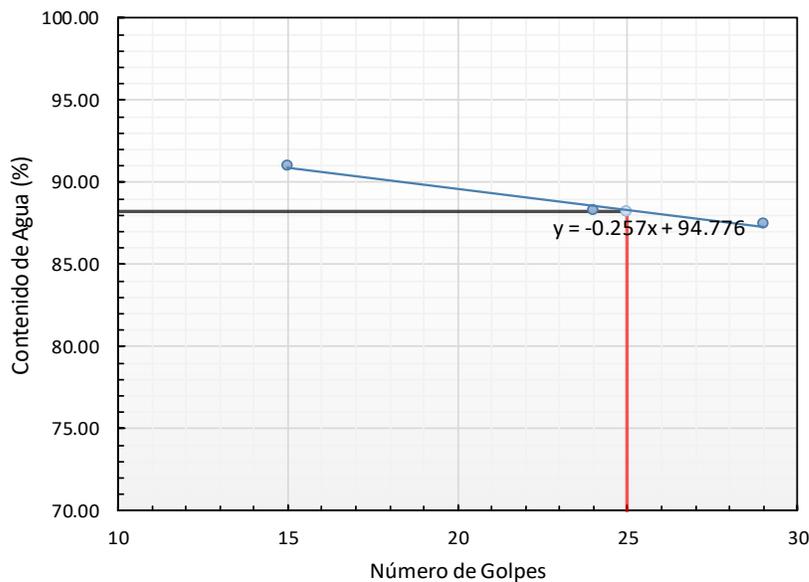
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	H-2	15	104.29	71.25	33.04	34.95	36.3	91.03
2	R-4D	24	99.13	70.64	28.49	38.38	32.26	88.32
3	W-2	29	94.03	67.77	26.26	37.76	30.01	87.51

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	3F		21.90	19.84	2.06	14.69	5.15	40.07
2	150		22.32	19.66	2.66	12.77	6.89	38.67
PROMEDIO								39.37

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 88.27 %

LP= 39.37 %

IP= 48.90 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 42. Prueba de límites de Atterberg para E4-30 repetición 1.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-04-30-EZ-R2								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

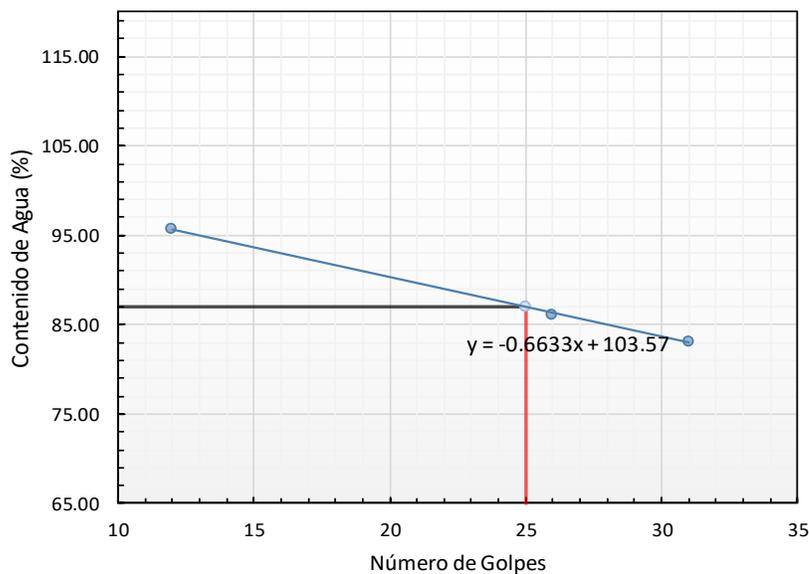
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	116.00	12	65.82	51.11	14.71	35.73	15.38	95.65
2	159.00	26	74.86	56.3	18.56	34.76	21.54	86.17
3	174.00	31	69.28	54.22	15.06	36.1	18.12	83.12

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	G		23.66	22.22	1.44	11.9	3.46	41.52
2	5.00		25.40	23.98	1.42	17.09	3.54	40.12
PROMEDIO								40.82

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 87.01 %

LP= 40.82 %

IP= 46.19 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 43. Prueba de límites de Atterberg para E4-30 repetición 2.

LÍMITES DE CONSISTENCIA		
Obra: Stanza Granada	Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo	
Localización: Culiacán, Sinaloa		
Descripción: SR-04-30-EZ-R3		
Fecha Moldeo: 28/11/2023	Sondeo: PCA-1	Prof.: 2.0 m
Fecha Ensaye: 13/12/2023		

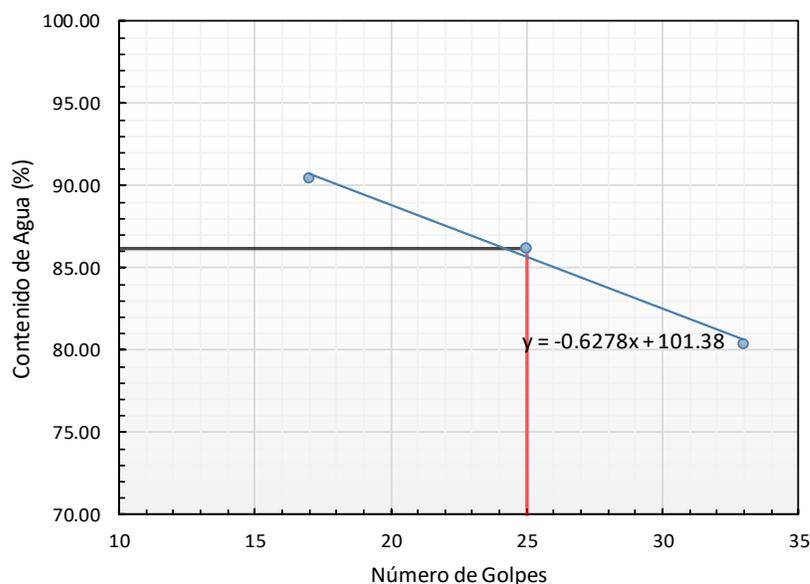
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	130	17	60.52	48.66	11.86	35.55	13.11	90.45
2	162	25	58.54	48.89	9.65	37.69	11.2	86.20
3	77	33	61.15	49.22	11.93	34.38	14.84	80.40

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	G		23.58	20.24	3.34	11.9	8.34	40.09
2	5.00		24.57	22.5	2.07	17.09	5.41	38.29
PROMEDIO								39.19

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 86.20 %  
 LP= 39.19 %  
 IP= 47.01 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 44. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 3.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada			Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo					
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-08-30-EZ-R1								
Fecha Moldeo: 28/11/2023			Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

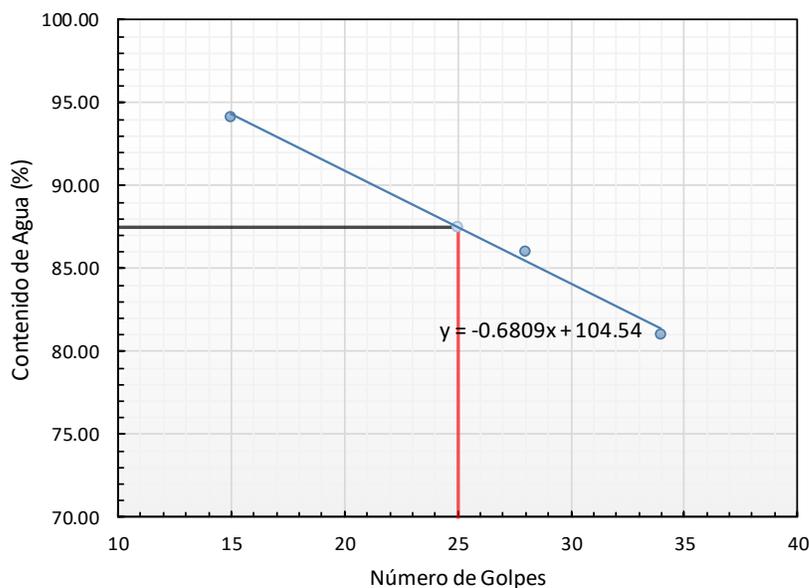
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	Z-7	15	76.75	56.3	20.45	34.58	21.72	94.15
2	H-2	28	82.24	60.37	21.87	34.95	25.42	86.02
3	W-2	34	96.23	70.06	26.17	37.76	32.3	81.01

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	R-2		20.72	18.44	2.28	12.46	5.98	38.17
2	3-G		21.96	19.5	2.46	12.82	6.68	36.77
PROMEDIO								37.47

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 87.53 %

LP= 37.47 %

IP= 50.06 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 45. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 1.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-08-30-EZ-R2								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1		Prof.: 2.0 m		
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

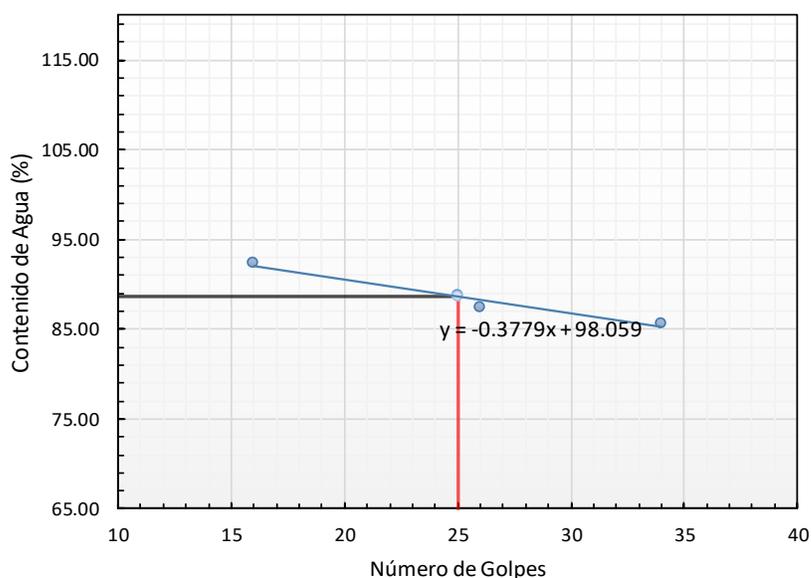
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	78.00	16	56.65	46.57	10.08	35.65	10.92	92.34
2	172.00	26	62.49	50.4	12.09	36.58	13.82	87.50
3	166.00	34	63.39	50.98	12.41	36.49	14.49	85.62

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	25		22.49	21.14	1.35	17.99	3.46	38.89
2	7.00		22.53	21.2	1.33	17.44	3.54	37.49
PROMEDIO								38.19

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 88.64 %

LP= 38.19 %

IP= 50.45 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 46. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 2.

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Obra: Stanza Granada				Laboratorista: Hoziel Alfonso Lugo				
Localización: Culiacán, Sinaloa								
Descripción: SR-08-30-EZ-R3								
Fecha Moldeo: 28/11/2023				Sondeo: PCA-1			Prof.: 2.0 m	
Fecha Ensaye: 13/12/2023								

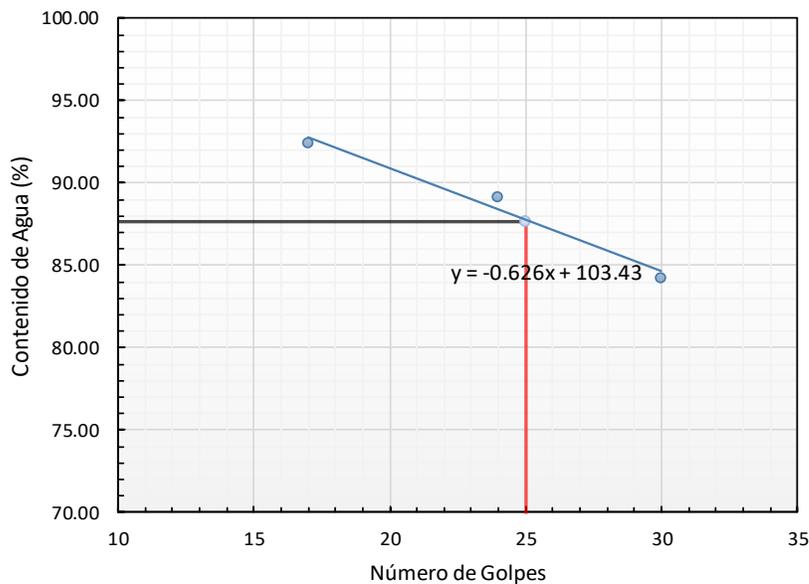
### LÍMITE LÍQUIDO

Prueba	Capsula	#Golpes	Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	165	17	55.90	46.11	9.79	35.52	10.59	92.45
2	170	24	59.59	49.15	10.44	37.44	11.71	89.14
3	161	30	62.60	50.64	11.96	36.45	14.19	84.25

### LÍMITE PLÁSTICO

Prueba	Capsula		Wc+ Wsh (gr)	Wc. + Wss (gr)	Wagua (gr)	Wc (gr)	Wss (gr)	W%
1	25		22.51	21.19	1.32	17.99	3.2	41.14
2	7.00		22.72	21.23	1.49	17.44	3.79	39.34
PROMEDIO								40.24

### REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO



#### RESUMEN:

LL= 87.69 %

LP= 40.24 %

IP= 47.45 %

Clasificación S.U.C.S.

OBSERVACIÓN:

NORMAS: AASHTO T 89-68 Y T90-70; ASTM 423-66 Y D424-59

Figura 47. Prueba de límites de Atterberg para E8-30 repetición 3.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	26/11/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	27/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-00-00-R1			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscuro compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	M-D					
W Recipiente	38.1	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	120.6	gr				
W suelo seco + recipiente	99.8	gr				
W Agua	20.8	gr				
W suelo húmedo	82.5	gr				
W suelo seco	61.7		Contenido de Humedad %		33.7%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.13			Peso muestra	211.7	
Área inicial	13.42			Peso volumétrico	1.71	
Altura inicial	9.25			Relación H/D	2.24	
Volumen inicial	124.07					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.418091	0
0.002	0.00508	0.000549	251	0.251	13.425467	0.018696
0.004	0.01016	0.001099	516	0.767	13.432851	0.057099
0.006	0.01524	0.001648	529.9	1.297	13.440243	0.096494
0.012	0.03048	0.003296	1000	2.297	13.462468	0.170615
0.015	0.0381	0.004120	996.6	3.294	13.473608	0.244441
0.019	0.04826	0.005219	1001.6	4.295	13.488490	0.318427
0.024	0.06096	0.006593	998.1	5.293	13.507139	0.391882
0.029	0.07366	0.007966	1007.2	6.300	13.525840	0.465805
0.034	0.08636	0.009340	1080	7.380	13.544592	0.544896
0.038	0.09652	0.010438	1000.4	8.381	13.559632	0.618070
0.047	0.11938	0.012911	1990.3	10.371	13.593593	0.762940
0.057	0.14478	0.015658	2007.8	12.379	13.631527	0.908108
0.08	0.2032	0.021975	4035	16.414	13.719586	1.196385
0.11	0.2794	0.030216	4010	20.424	13.836169	1.476124
0.135	0.3429	0.037084	1982.4	22.406	13.934846	1.607933
FALLA						

Figura 48. Prueba de compresión no confinada para C repetición 1.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	26/11/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	27/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-00-00-R2			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscuro compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	SS-H					
W Recipiente	35.3	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	115.5	gr				
W suelo seco + recipiente	94.4	gr				
W Agua	21.1	gr				
W suelo húmedo	80.2	gr				
W suelo seco	59.1	Contenido de Humedad %			35.7%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.13			Peso muestra	203.6	
Área inicial	13.40			Peso volumétrico	1.65	
Altura inicial	9.22			Relación H/D	2.23	
Volumen inicial	123.47					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.396458	0.000000
0.001	0.00254	0.000276	251	0.251	13.400151	0.018731
0.005	0.0127	0.001378	516	0.767	13.414943	0.057175
0.013	0.03302	0.003583	529.9	1.297	13.444625	0.096462
0.023	0.05842	0.006339	1000	2.297	13.481913	0.170369
0.031	0.07874	0.008543	996.6	3.294	13.511893	0.243748
0.039	0.09906	0.010748	1001.6	4.295	13.542006	0.317169
0.045	0.1143	0.012401	998.1	5.293	13.564680	0.390219
0.052	0.13208	0.014331	1007.2	6.300	13.591228	0.463564
0.06	0.1524	0.016535	1080	7.380	13.621696	0.541812
0.067	0.17018	0.018464	1000.4	8.381	13.648468	0.614047
0.082	0.20828	0.022598	1990.3	10.371	13.706193	0.756673
0.095	0.2413	0.026181	2007.8	12.379	13.756618	0.899851
0.118	0.29972	0.032519	4035	16.414	13.846745	1.185398
0.138	0.35052	0.038031	1982.4	18.396	13.926082	1.320996
FALLA						

Figura 49. Prueba de compresión no confinada para C repetición 2.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	26/11/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	27/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-00-00-R3			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscuro compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	X1					
W Recipiente	34.2	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	74.3	gr				
W suelo seco + recipiente	63.8	gr				
W Agua	10.5	gr				
W suelo húmedo	40.1	gr				
W suelo seco	29.6		Contenido de Humedad %		35.5%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.10			Peso muestra	199.5	
Área inicial	13.22			Peso volumétrico	1.67	
Altura inicial	9.03			Relación H/D	2.20	
Volumen inicial	119.38					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.220000	0.000000
0.001	0.00254	0.000281	250	0.250	13.223720	0.018905
0.002	0.00508	0.000563	516	0.766	13.227441	0.057910
0.006	0.01524	0.001688	490.3	1.256	13.242349	0.094870
0.011	0.02794	0.003094	1007.2	2.264	13.261031	0.170688
0.015	0.0381	0.004219	1003.3	3.267	13.276015	0.246068
0.023	0.05842	0.006470	1001.6	4.268	13.306084	0.320786
0.031	0.07874	0.008720	1004.6	5.273	13.336290	0.395387
0.038	0.09652	0.010689	1010.2	6.283	13.362833	0.470200
0.047	0.11938	0.013220	1080	7.363	13.397115	0.549611
0.056	0.14224	0.015752	988.1	8.351	13.431573	0.621766
0.074	0.18796	0.020815	2007.8	10.359	13.501025	0.767283
0.097	0.24638	0.027285	1990.3	12.349	13.590820	0.908657
0.124	0.31496	0.034879	4017	16.366	13.697768	1.194822
FALLA						

Figura 50. Prueba de compresión no confinada para C repetición 3.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-02-15-EZ-R1			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	P+2					
W Recipiente	40.1	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	145.7	gr				
W suelo seco + recipiente	118.9	gr				
W Agua	26.8	gr				
W suelo húmedo	105.6	gr				
W suelo seco	78.8		Contenido de Humedad %		34%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.17			Peso muestra	209.5	
Área inicial	13.66			Peso volumétrico	1.67	
Altura inicial	9.16			Relación H/D	2.20	
Volumen inicial	125.10					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon_s/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida ( $A_0/1-\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.0000000	0	0.000	13.657210	0.000000
0.001	0.00254	0.0002773	249.2	0.249	13.660998	0.018242
0.004	0.01016	0.0011092	457.2	0.706	13.672375	0.051666
0.007	0.01778	0.0019410	526.9	1.233	13.683771	0.090129
0.012	0.03048	0.0033275	1010.2	2.244	13.702806	0.163726
0.016	0.04064	0.0044367	1000.6	3.244	13.718073	0.236484
0.02	0.0508	0.0055459	1004.6	4.249	13.733373	0.309370
0.024	0.06096	0.0066550	1008.7	5.257	13.748708	0.382392
0.027	0.06858	0.0074869	1003.3	6.261	13.760232	0.454985
0.03	0.0762	0.0083188	996.7	7.257	13.771774	0.526976
0.034	0.08636	0.0094279	1080	8.337	13.787195	0.604721
0.039	0.09906	0.0108144	2007.8	10.345	13.806519	0.749298
0.046	0.11684	0.0127555	2005.7	12.351	13.833665	0.892815
0.053	0.13462	0.0146965	2005	14.356	13.860917	1.035711
0.066	0.16764	0.0183013	4017	18.373	13.911815	1.320669
0.079	0.20066	0.0219061	4015	22.388	13.963087	1.603363
0.096	0.24384	0.0266201	4014	26.402	14.030709	1.881722
0.115	0.2921	0.0318886	4035	30.437	14.107065	2.157564
0.121	0.30734	0.0335524	986.7	31.424	14.131351	2.223680
0.127	0.32258	0.0352162	941.9	32.366	14.155720	2.286390
0.145	0.3683	0.0402074	3990	36.356	14.229335	2.554968
0.173	0.43942	0.0479716	4010	40.366	14.345381	2.813833
FALLA						

Figura 51. Prueba de compresión no confinada para E2-15 repetición 1.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-02-15-EZ-R2			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	W1					
W Recipiente	34	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	127	gr				
W suelo seco + recipiente	104.2	gr				
W Agua	22.8	gr				
W suelo húmedo	93	gr				
W suelo seco	70.2		Contenido de Humedad %		32.5%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.12			Peso muestra	210.7	
Área inicial	13.31			Peso volumétrico	1.70	
Altura inicial	9.31			Relación H/D	2.26	
Volumen inicial	123.87					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.00000	0	0.000	13.310099	0.000000
0.002	0.00508	0.00055	249.2	0.249	13.3173683	0.018712
0.005	0.0127	0.00136	457.2	0.706	13.328287	0.053000
0.009	0.02286	0.00246	526.9	1.233	13.3428732	0.092431
0.014	0.03556	0.00382	1010.2	2.244	13.3611509	0.167912
0.019	0.04826	0.00519	1000.6	3.244	13.3794787	0.242468
0.025	0.0635	0.00682	1004.6	4.249	13.4015386	0.317031
0.029	0.07366	0.00791	1008.7	5.257	13.4162857	0.391867
0.033	0.08382	0.00901	1003.3	6.261	13.4310652	0.466136
0.036	0.09144	0.00983	996.7	7.257	13.4421713	0.539898
0.04	0.1016	0.01092	1080	8.337	13.4570079	0.619558
0.046	0.11684	0.01255	2007.8	10.345	13.4793244	0.767487
0.053	0.13462	0.01446	2005.7	12.351	13.5054541	0.914512
0.06	0.1524	0.01638	2005	14.356	13.5316852	1.060910
0.075	0.1905	0.02047	4017	18.373	13.5882394	1.352118
0.091	0.23114	0.02484	4015	22.388	13.6490872	1.640249
0.108	0.27432	0.02948	4014	26.402	13.714338	1.925131
0.128	0.32512	0.03493	4035	30.437	13.7919069	2.206867
0.137	0.34798	0.03739	986.7	31.424	13.8270999	2.272610
0.144	0.36576	0.03930	941.9	32.366	13.8545966	2.336084
0.163	0.41402	0.04449	3990	36.356	13.9297849	2.609911
0.182	0.46228	0.04967	4010	40.366	14.0057937	2.882057
FALLA						

Figura 52. Prueba de compresión no confinada para E2-15 repetición 2.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-02-15-EZ-R3			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	FF					
W Recipiente	34.6	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	109.2	gr				
W suelo seco + recipiente	90.1	gr				
W Agua	19.1	gr				
W suelo húmedo	74.6	gr				
W suelo seco	55.5	Contenido de Humedad %			34.4%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.14			Peso muestra	210.7	
Área inicial	13.46			Peso volumétrico	1.68	
Altura inicial	9.33			Relación H/D	2.25	
Volumen inicial	125.64					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.00000	0	0.000	13.4614104	0.000000
0.001	0.00254	0.00027	249.2	0.249	13.4650748	0.018507
0.004	0.01016	0.00109	457.2	0.706	13.47608	0.052419
0.008	0.02032	0.00218	526.9	1.233	13.4907817	0.091418
0.014	0.03556	0.00381	1010.2	2.244	13.5128945	0.166027
0.018	0.04572	0.00490	1000.6	3.244	13.5276767	0.239812
0.026	0.06604	0.00708	1004.6	4.249	13.5573382	0.313387
0.03	0.0762	0.00816	1008.7	5.257	13.5722178	0.387365
0.034	0.08636	0.00925	1003.3	6.261	13.5871301	0.460782
0.036	0.09144	0.00980	996.7	7.257	13.5945986	0.533844
0.04	0.1016	0.01089	1080	8.337	13.6095601	0.612613
0.046	0.11684	0.01252	2007.8	10.345	13.6320643	0.758887
0.053	0.13462	0.01442	2005.7	12.351	13.6584135	0.904270
0.06	0.1524	0.01633	2005	14.356	13.6848647	1.049035
0.075	0.1905	0.02041	4017	18.373	13.7418922	1.336999
0.091	0.23114	0.02477	4015	22.388	13.8032478	1.621930
0.108	0.27432	0.02939	4014	26.402	13.8690413	1.903657
0.122	0.30988	0.03320	4035	30.437	13.923697	2.185978
0.129	0.32766	0.03511	986.7	31.424	13.9511867	2.252396
0.139	0.35306	0.03783	941.9	32.366	13.9906465	2.313367
0.159	0.40386	0.04327	3990	36.356	14.0702397	2.583858
0.179	0.45466	0.04871	4010	40.366	14.1507436	2.852536
FALLA						

Figura 53. Prueba de compresión no confinada para E2-15 repetición 3.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-04-15-EZ-R1			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	S-10					
W Recipiente	39.2	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	120.9	gr				
W suelo seco + recipiente	101.1	gr				
W Agua	19.8	gr				
W suelo húmedo	81.7	gr				
W suelo seco	61.9		Contenido de Humedad %		32.0%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.15			Peso muestra	215.8	
Área inicial	13.53			Peso volumétrico	1.71	
Altura inicial	9.33			Relación H/D	2.25	
Volumen inicial	126.25					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon_s/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.52652	0.000000
0.001	0.00254	0.000272	249.2	0.249	13.53020	0.018418
0.003	0.00762	0.000816	457.2	0.706	13.53757	0.052181
0.006	0.01524	0.001633	526.9	1.233	13.54864	0.091028
0.011	0.02794	0.002994	1010.2	2.244	13.56713	0.165363
0.015	0.0381	0.004082	1000.6	3.244	13.58196	0.238854
0.019	0.04826	0.005171	1004.6	4.249	13.59683	0.312477
0.022	0.05588	0.005987	1008.7	5.257	13.60799	0.386346
0.025	0.0635	0.006804	1003.3	6.261	13.61918	0.459697
0.029	0.07366	0.007892	996.7	7.257	13.63412	0.532297
0.032	0.08128	0.008709	1080	8.337	13.64535	0.611007
0.037	0.09398	0.010069	2007.8	10.345	13.66411	0.757108
0.042	0.10668	0.011430	2005.7	12.351	13.68292	0.902651
0.049	0.12446	0.013335	2005	14.356	13.70933	1.047162
0.06	0.1524	0.016329	4017	18.373	13.75105	1.336108
0.074	0.18796	0.020139	4015	22.388	13.80452	1.621780
0.089	0.22606	0.024221	4014	26.402	13.86227	1.904586
0.105	0.2667	0.028575	4035	30.437	13.92441	2.185866
0.113	0.28702	0.030752	986.7	31.424	13.95569	2.251670
0.118	0.29972	0.032113	941.9	32.366	13.97531	2.315906
0.137	0.34798	0.037284	3990	36.356	14.05037	2.587512
FALLA						

Figura 54. Prueba de compresión no confinada para E4-15 repetición 1.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	07/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-04-15-EZ-R2			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	SA-5					
W Recipiente	34.3	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	123.1	gr				
W suelo seco + recipiente	101.4	gr				
W Agua	21.7	gr				
W suelo húmedo	88.8	gr				
W suelo seco	67.1		Contenido de Humedad %			32.3%
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.13			Peso muestra	215.8	
Área inicial	13.42			Peso volumétrico	1.76	
Altura inicial	9.15			Relación H/D	2.21	
Volumen inicial	122.73					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon_s/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.418091	0.000000
0	0	0.000000	249.2	0.249	13.418091	0.018572
0.001	0.00254	0.000278	457.2	0.706	13.421818	0.052631
0.003	0.00762	0.000833	526.9	1.233	13.429279	0.091837
0.009	0.02286	0.002499	1010.2	2.244	13.451711	0.166782
0.015	0.0381	0.004165	1000.6	3.244	13.474217	0.240764
0.025	0.0635	0.006942	1004.6	4.249	13.511897	0.314441
0.033	0.08382	0.009164	1008.7	5.257	13.542192	0.388224
0.039	0.09906	0.010830	1003.3	6.261	13.565003	0.461533
0.042	0.10668	0.011663	996.7	7.257	13.576437	0.534559
0.052	0.13208	0.014440	1080	8.337	13.614691	0.612383
0.064	0.16256	0.017773	2007.8	10.345	13.660881	0.757286
0.076	0.19304	0.021105	3999.9	14.345	13.707385	1.046523
0.089	0.22606	0.024715	4010	18.355	13.758124	1.334128
0.125	0.3175	0.034712	4017	22.372	13.900611	1.609433
FALLA						

Figura 55. Prueba de compresión no confinada para E4-15 repetición 2.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	07/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-04-15-EZ-R3			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	SS-4					
W Recipiente	33.9	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	109.3	gr				
W suelo seco + recipiente	90.12	gr				
W Agua	19.18	gr				
W suelo húmedo	75.4	gr				
W suelo seco	56.22		Contenido de Humedad %			34.1%
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.14			Peso muestra	200.5	
Área inicial	13.44			Peso volumétrico	1.65	
Altura inicial	9.03			Relación H/D	2.18	
Volumen inicial	121.36					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0	13.439742	0.000000
0.001	0.00254	0.000281	250	0.25	13.443524	0.018596
0.003	0.00762	0.000844	490.3	0.7403	13.451093	0.055036
0.006	0.01524	0.001688	516.9	1.2572	13.462463	0.093386
0.009	0.02286	0.002532	988.1	2.2453	13.473852	0.166641
0.013	0.03302	0.003657	1080	3.3253	13.489068	0.246518
0.017	0.04318	0.004782	1010.2	4.3355	13.504318	0.321045
0.021	0.05334	0.005907	1004.6	5.3401	13.519602	0.394989
0.026	0.06604	0.007313	1001.6	6.3417	13.538756	0.468411
0.029	0.07366	0.008157	1003.3	7.345	13.550275	0.542055
0.032	0.08128	0.009001	1007.2	8.3522	13.561813	0.615862
0.043	0.10922	0.012095	1000.4	9.3526	13.604289	0.687474
0.051	0.12954	0.014346	1008.7	10.3613	13.635348	0.759885
0.062	0.15748	0.017440	1990.3	12.3516	13.678287	0.903008
0.069	0.17526	0.019409	2007.8	14.3594	13.705752	1.047692
0.075	0.1905	0.021096	2030.5	16.3899	13.729382	1.193783
0.086	0.21844	0.024190	2028.2	18.4181	13.772915	1.337270
0.098	0.24892	0.027566	4010	22.4281	13.820723	1.622788
0.121	0.30734	0.034035	4017	26.4451	13.913287	1.900708
0.147	0.37338	0.041349	4015	30.4601	14.019429	2.172706
FALLA						

Figura 56. Prueba de compresión no confinada para E4-15 repetición 3.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-08-15-EZ-R1			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	B-4					
W Recipiente	34.7	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	118.5	gr				
W suelo seco + recipiente	99.2	gr				
W Agua	19.3	gr				
W suelo húmedo	83.8	gr				
W suelo seco	64.5		Contenido de Humedad %			29.9%
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.11			Peso muestra	199.8	
Área inicial	13.25			Peso volumétrico	1.69	
Altura inicial	8.92			Relación H/D	2.17	
Volumen inicial	118.19					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.245513	0.000000
0.005	0.0127	0.001423	249.2	0.249	13.264391	0.018787
0.009	0.02286	0.002562	457.2	0.706	13.279533	0.053195
0.013	0.03302	0.003700	526.9	1.233	13.294709	0.092766
0.019	0.04826	0.005408	1010.2	2.244	13.317538	0.168462
0.025	0.0635	0.007116	1000.6	3.244	13.340446	0.243178
0.032	0.08128	0.009109	1004.6	4.249	13.367272	0.317843
0.037	0.09398	0.010532	1008.7	5.257	13.386499	0.392739
0.042	0.10668	0.011955	1003.3	6.261	13.405782	0.467015
0.048	0.12192	0.013663	996.7	7.257	13.428994	0.540428
0.055	0.1397	0.015656	1080	8.337	13.456177	0.619596
0.065	0.1651	0.018502	2007.8	10.345	13.495202	0.766584
0.078	0.19812	0.022202	2005.7	12.351	13.546274	0.911756
0.091	0.23114	0.025903	2005	14.356	13.597734	1.055757
0.13	0.3302	0.037004	4017	18.373	13.754486	1.335775
0.143	0.36322	0.040705	953.9	19.327	13.807543	1.399728
0.16	0.4064	0.045544	1046.8	20.374	13.877545	1.468098
FALLA						

Figura 57. Prueba de compresión no confinada para E8-15 repetición 1.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	07/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-08-15-EZ-R2			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	LL-78					
W Recipiente	34.1		gr			
W suelo húmedo+ recipiente	142.8		gr			
W suelo seco + recipiente	116.7		gr			
W Agua	26.1		gr			
W suelo húmedo	108.7		gr			
W suelo seco	82.6	Contenido de Humedad %			31.6%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.14			Peso muestra	204.3	
Área inicial	13.44			Peso volumétrico	1.66	
Altura inicial	9.18			Relación H/D	2.22	
Volumen inicial	123.42					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida ( $A_0/1-\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.439742	0.000000
0.002	0.00508	0.000553	249.2	0.249	13.447181	0.018532
0.005	0.0127	0.001383	457.2	0.706	13.458354	0.052488
0.009	0.02286	0.002489	526.9	1.233	13.473281	0.091537
0.015	0.0381	0.004149	1010.2	2.244	13.495733	0.166238
0.018	0.04572	0.004979	1000.6	3.244	13.506988	0.240179
0.022	0.05588	0.006085	1004.6	4.249	13.522023	0.314206
0.026	0.06604	0.007191	1008.7	5.257	13.537091	0.388370
0.029	0.07366	0.008021	1003.3	6.261	13.548415	0.462098
0.033	0.08382	0.009127	996.7	7.257	13.563542	0.535067
0.037	0.09398	0.010234	1080	8.337	13.578703	0.614006
0.045	0.1143	0.012446	2007.8	10.345	13.609128	0.760166
0.054	0.13716	0.014936	2005.7	12.351	13.643518	0.905258
0.062	0.15748	0.017148	2005	14.356	13.674234	1.049850
0.081	0.20574	0.022404	4017	18.373	13.747741	1.336430
0.108	0.27432	0.029872	4015	22.388	13.853569	1.616038
0.118	0.29972	0.032637	953.9	23.342	13.893179	1.680091
0.131	0.33274	0.036233	1046.8	24.389	13.945012	1.748912
FALLA						

Figura 58. Prueba de compresión no confinada para E8-15 repetición 2.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	07/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-08-15-EZ-R3			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	LL-78					
W Recipiente	34.1	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	119.7	gr				
W suelo seco + recipiente	97.3	gr				
W Agua	22.4	gr				
W suelo húmedo	85.6	gr				
W suelo seco	63.2	Contenido de Humedad %			35.4%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.12			Peso muestra	204.3	
Área inicial	13.35			Peso volumétrico	1.67	
Altura inicial	9.14			Relación H/D	2.22	
Volumen inicial	122.00					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0.000000	0	0.000	13.353244	0.000000
0.008	0.02032	0.002224	250	0.250	13.383007	0.018680
0.014	0.03556	0.003892	490.3	0.740	13.405418	0.055224
0.016	0.04064	0.004448	516.9	1.257	13.412904	0.093731
0.023	0.05842	0.006394	998.1	2.255	13.439174	0.167815
0.029	0.07366	0.008062	1080	3.335	13.461773	0.247761
0.034	0.08636	0.009452	1010.2	4.346	13.480663	0.322351
0.04	0.1016	0.011120	1004.6	5.350	13.503402	0.396204
0.045	0.1143	0.012510	1001.6	6.352	13.522409	0.469717
0.051	0.12954	0.014178	1003.3	7.355	13.545289	0.542993
0.056	0.14224	0.015568	1007.2	8.362	13.564415	0.616481
0.064	0.16256	0.017792	1000.4	9.363	13.595129	0.688673
0.069	0.17526	0.019182	1008.7	10.371	13.614396	0.761789
0.079	0.20066	0.021962	2007.8	12.379	13.653094	0.906688
0.095	0.2413	0.026410	1990.3	14.369	13.715470	1.047678
0.114	0.28956	0.031692	2023.5	16.393	13.790286	1.188728
0.128	0.32512	0.035584	2028.2	18.421	13.845939	1.330433
0.139	0.35306	0.038642	4010	22.431	13.889982	1.614912
0.146	0.37084	0.040588	1009	23.440	13.918155	1.684138
FALLA						

Figura 59. Prueba de compresión no confinada para E8-15 repetición 3.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-02-30-EZ-R1			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	P+2					
W Recipiente	40.1		gr			
W suelo h+umedo+ recipiente	145.7		gr			
W suelo seco + recipiente	118.9		gr			
W Agua	26.8		gr			
W suelo húmedo	105.6		gr			
W suelo seco	78.8	Contenido de Humedad %			34%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.17			Peso muestra	209.5	
Área inicial	13.66			Peso volumétrico	1.67	
Altura inicial	9.16			Relación H/D	2.20	
Volumen inicial	125.10					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida ( $A_0/1-\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0.000	13.657210	0
0.001	0.00254	0.000277	251	0.251	13.660998	0.018373
0.003	0.00762	0.000832	457.2	0.708	13.668581	0.051812
0.007	0.01778	0.001941	526.9	1.235	13.683771	0.090260
0.014	0.03556	0.003882	1007.2	2.242	13.710435	0.163547
0.018	0.04572	0.004991	1000.6	3.243	13.725719	0.236264
0.023	0.05842	0.006378	1007.6	4.251	13.744871	0.309243
0.028	0.07112	0.007764	1080	5.331	13.764077	0.387276
0.033	0.08382	0.009151	1000	6.331	13.783337	0.459286
0.038	0.09652	0.010537	988.1	7.319	13.802650	0.530232
0.044	0.11176	0.012201	1134.8	8.453	13.825898	0.611418
0.055	0.1397	0.015251	2007.8	10.461	13.868723	0.754302
0.066	0.16764	0.018301	2000	12.461	13.911815	0.895728
0.076	0.19304	0.021074	1959	14.420	13.951221	1.033616
0.094	0.23876	0.026066	4017	18.437	14.022719	1.314809
0.11	0.2794	0.030502	4015	22.452	14.086891	1.593836
0.136	0.34544	0.037712	4014	26.466	14.192432	1.864811
0.158	0.40132	0.043812	4000	30.466	14.282979	2.133042
0.165	0.4191	0.045753	950	31.416	14.312032	2.195090
0.172	0.43688	0.047694	952.7	32.369	14.341204	2.257056
FALLA						

Figura 60. Prueba de compresión no confinada para E2-30 repetición 1.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-02-30-EZ-R2			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	W1					
W Recipiente	34	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	127	gr				
W suelo seco + recipiente	104.2	gr				
W Agua	22.8	gr				
W suelo húmedo	93	gr				
W suelo seco	70.2	Contenido de Humedad %			32.5%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.12			Peso muestra	210.7	
Área inicial	13.31			Peso volumétrico	1.70	
Altura inicial	9.31			Relación H/D	2.26	
Volumen inicial	123.87					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.310099	0
0.002	0.00508	0.0005458	251	0.251	13.317368	0.018848
0.004	0.01016	0.0010917	457.2	0.708	13.324645	0.053150
0.006	0.01524	0.0016375	526.9	1.235	13.331931	0.092642
0.012	0.03048	0.0032751	1007.2	2.242	13.353834	0.167914
0.017	0.04318	0.0046397	1000.6	3.243	13.372142	0.242512
0.021	0.05334	0.0057314	1007.6	4.251	13.386824	0.317514
0.025	0.0635	0.0068231	1080	5.331	13.401539	0.397753
0.029	0.07366	0.0079148	1000	6.331	13.416286	0.471852
0.032	0.08128	0.0087335	988.1	7.319	13.427367	0.545051
0.036	0.09144	0.0098252	1134.8	8.453	13.442171	0.628872
0.043	0.10922	0.0117357	2007.8	10.461	13.468157	0.776736
0.05	0.127	0.0136461	2000	12.461	13.494243	0.923446
0.058	0.14732	0.0158295	1959	14.420	13.524180	1.066253
0.075	0.1905	0.0204692	4017	18.437	13.588239	1.356850
0.093	0.23622	0.0253818	4015	22.452	13.656732	1.644039
0.113	0.28702	0.0308403	4014	26.466	13.733648	1.927106
0.134	0.34036	0.0365716	4000	30.466	13.815349	2.205243
0.142	0.36068	0.0387550	950	31.416	13.846729	2.268853
0.149	0.37846	0.0406655	952.7	32.369	13.874304	2.333011
0.176	0.44704	0.0480344	3990	36.359	13.981701	2.600463
FALLA						

Figura 61. Prueba de compresión no confinada para E2-30 repetición 2.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	21/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	06/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-02-30-EZ-R3			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	PP					
W Recipiente	34.5	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	119.8	gr				
W suelo seco + recipiente	99.1	gr				
W Agua	20.7	gr				
W suelo húmedo	85.3	gr				
W suelo seco	64.6		Contenido de Humedad %			32.0%
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.13			Peso muestra	210.7	
Área inicial	13.37			Peso volumétrico	1.69	
Altura inicial	9.33			Relación H/D	2.26	
Volumen inicial	124.79					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida ( $A_0/1-\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.374842	0
0.002	0.00508	0.0005445	251	0.251	13.382128	0.018756
0.004	0.01016	0.0010890	457.2	0.708	13.389423	0.052892
0.006	0.01524	0.0016334	526.9	1.235	13.396725	0.092194
0.012	0.03048	0.0032669	1007.2	2.242	13.418679	0.167103
0.017	0.04318	0.0046281	1000.6	3.243	13.437030	0.241341
0.021	0.05334	0.0057170	1007.6	4.251	13.451746	0.315981
0.025	0.0635	0.0068060	1080	5.331	13.466495	0.395834
0.029	0.07366	0.0078950	1000	6.331	13.481276	0.469577
0.032	0.08128	0.0087117	988.1	7.319	13.492383	0.542425
0.036	0.09144	0.0098006	1134.8	8.453	13.507221	0.625843
0.043	0.10922	0.0117063	2007.8	10.461	13.533267	0.772999
0.05	0.127	0.0136120	2000	12.461	13.559413	0.919007
0.058	0.14732	0.0157899	1959	14.420	13.589418	1.061134
0.075	0.1905	0.0204180	4017	18.437	13.653622	1.350352
0.093	0.23622	0.0253183	4015	22.452	13.722267	1.636187
0.113	0.28702	0.0307631	4014	26.466	13.799353	1.917930
0.134	0.34036	0.0364802	4000	30.466	13.881232	2.194776
0.142	0.36068	0.0386581	950	31.416	13.912680	2.258098
0.149	0.37846	0.0405638	952.7	32.369	13.940314	2.321964
0.176	0.44704	0.0479143	2005	34.374	14.047939	2.446900
FALLA						

Figura 62. Prueba de compresión no confinada para E2-30 repetición 3.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	20/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-04-30-EZ-R1			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	SA-12					
W Recipiente	34.7	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	112.8	gr				
W suelo seco + recipiente	93.7	gr				
W Agua	19.1	gr				
W suelo húmedo	78.1	gr				
W suelo seco	59		Contenido de Humedad %		32.4%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.09			Peso muestra	197.9	
Área inicial	13.14			Peso volumétrico	1.64	
Altura inicial	9.16			Relación H/D	2.24	
Volumen inicial	120.35					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.138219	0
0.001	0.00254	0.0002773	251	0.251	13.141863	0.019099
0.005	0.0127	0.0013865	457.2	0.708	13.156460	0.053829
0.008	0.02032	0.0022183	526.9	1.235	13.167429	0.093800
0.014	0.03556	0.0038821	1007.2	2.242	13.189422	0.170007
0.019	0.04826	0.0052686	1000.6	3.243	13.207805	0.245529
0.023	0.05842	0.0063777	1007.6	4.251	13.222549	0.321458
0.028	0.07112	0.0077642	1080	5.331	13.241025	0.402575
0.032	0.08128	0.0088734	1000	6.331	13.255843	0.477563
0.035	0.0889	0.0097052	988.1	7.319	13.266978	0.551640
0.038	0.09652	0.0105371	1134.8	8.453	13.278132	0.636641
0.043	0.10922	0.0119236	2007.8	10.461	13.296764	0.786748
0.049	0.12446	0.0135873	2000	12.461	13.319191	0.935582
0.055	0.1397	0.0152511	1959	14.420	13.341694	1.080837
0.069	0.17526	0.0191332	4017	18.437	13.394498	1.376476
0.086	0.21844	0.0238472	4015	22.452	13.459182	1.668170
0.11	0.2794	0.0305022	4014	26.466	13.551572	1.952999
FALLA						

Figura 63. Prueba de compresión no confinada para E4-30 repetición 1.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	20/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-04-30-EZ-R2			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	H-S					
W Recipiente	35	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	108.9	gr				
W suelo seco + recipiente	92	gr				
W Agua	16.9	gr				
W suelo húmedo	73.9	gr				
W suelo seco	57		Contenido de Humedad %			29.6%
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.11			Peso muestra	205.6	
Área inicial	13.27			Peso volumétrico	1.69	
Altura inicial	9.16			Relación H/D	2.23	
Volumen inicial	121.48					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.2670243	0
0.001	0.00254	0.0002774	251	0.251	13.270706	0.018914
0.002	0.00508	0.0005548	457.2	0.708	13.274389	0.053351
0.004	0.01016	0.0011096	526.9	1.235	13.281761	0.092992
0.009	0.02286	0.0024965	1007.2	2.242	13.300229	0.168591
0.011	0.02794	0.0030513	1000.6	3.243	13.307630	0.243687
0.014	0.03556	0.0038835	1007.6	4.251	13.318748	0.319137
0.017	0.04318	0.0047157	1080	5.331	13.329884	0.399891
0.02	0.0508	0.0055479	1000	6.331	13.341039	0.474513
0.023	0.05842	0.0063801	988.1	7.319	13.352212	0.548119
0.026	0.06604	0.0072122	1134.8	8.453	13.363404	0.632578
0.031	0.07874	0.0085992	2007.8	10.461	13.382100	0.781731
0.035	0.0889	0.0097088	2000	12.461	13.397094	0.930142
0.041	0.10414	0.0113731	1959	14.420	13.419648	1.074559
0.05	0.127	0.0138697	4017	18.437	13.453622	1.370427
0.06	0.1524	0.0166436	4015	22.452	13.491573	1.664165
0.072	0.18288	0.0199723	4014	26.466	13.537398	1.955043
0.086	0.21844	0.0238558	4000	30.466	13.591255	2.241603
0.09	0.2286	0.0249654	950	31.416	13.606722	2.308874
0.095	0.2413	0.0263524	952.7	32.369	13.626105	2.375506
0.14	0.3556	0.0388351	2005	34.374	13.803068	2.490309
FALLA						

Figura 64. Prueba de compresión no confinada para E4-30 repetición 2.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	20/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-04-30-EZ-R3			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	KL					
W Recipiente	34.8	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	109.4	gr				
W suelo seco + recipiente	90.8	gr				
W Agua	18.6	gr				
W suelo húmedo	74.6	gr				
W suelo seco	56		Contenido de Humedad %		33.2%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.10			Peso muestra	201.6	
Área inicial	13.20			Peso volumétrico	1.68	
Altura inicial	9.11			Relación H/D	2.22	
Volumen inicial	120.32					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.2025431	0
0.001	0.00254	0.0002787	251	0.251	13.206224	0.019006
0.002	0.00508	0.0005574	457.2	0.708	13.209907	0.053611
0.004	0.01016	0.0011149	526.9	1.235	13.217278	0.093446
0.009	0.02286	0.0025084	1007.2	2.242	13.235744	0.169412
0.011	0.02794	0.0030658	1000.6	3.243	13.243144	0.244874
0.014	0.03556	0.0039020	1007.6	4.251	13.254261	0.320689
0.017	0.04318	0.0047381	1080	5.331	13.265396	0.401835
0.02	0.0508	0.0055743	1000	6.331	13.276550	0.476818
0.023	0.05842	0.0064104	988.1	7.319	13.287723	0.550779
0.026	0.06604	0.0072465	1134.8	8.453	13.298914	0.635646
0.031	0.07874	0.0086401	2007.8	10.461	13.317608	0.785516
0.037	0.09398	0.0103124	2000	12.461	13.340111	0.934115
0.051	0.12954	0.0142143	1959	14.420	13.392915	1.076704
0.071	0.18034	0.0197886	2005	16.425	13.469077	1.219475
0.082	0.20828	0.0228544	1999.8	18.425	13.511337	1.363670
0.104	0.26416	0.0289861	4014	22.439	13.596657	1.650332
0.124	0.31496	0.0345604	4000	26.439	13.675162	1.933359
0.132	0.33528	0.0367901	950	27.389	13.706818	1.998203
FALLA						

Figura 65. Prueba de compresión no confinada para E4-30 repetición 3.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	20/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-08-30-EZ-R1			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	SS-H					
W Recipiente	35.3		gr			
W suelo húmedo+ recipiente	111.8		gr			
W suelo seco + recipiente	94.1		gr			
W Agua	17.7		gr			
W suelo húmedo	76.5		gr			
W suelo seco	58.8	Contenido de Humedad %			30.1%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.10			Peso muestra	202.2	
Área inicial	13.20			Peso volumétrico	1.68	
Altura inicial	9.13			Relación H/D	2.23	
Volumen inicial	120.54					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida ( $A_0/1-\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.2025431	0
0.002	0.00508	0.0005564	251	0.251	13.209893	0.019001
0.005	0.0127	0.0013910	457.2	0.708	13.220934	0.053567
0.007	0.01778	0.0019474	526.9	1.235	13.228304	0.093368
0.015	0.0381	0.0041731	1007.2	2.242	13.257869	0.169130
0.018	0.04572	0.0050077	1000.6	3.243	13.268990	0.244397
0.021	0.05334	0.0058423	1007.6	4.251	13.280129	0.320065
0.022	0.05588	0.0061205	1080	5.331	13.283847	0.401277
0.024	0.06096	0.0066769	1000	6.331	13.291288	0.476289
0.026	0.06604	0.0072333	988.1	7.319	13.298737	0.550323
0.029	0.07366	0.0080679	1134.8	8.453	13.309926	0.635120
0.033	0.08382	0.0091807	2007.8	10.461	13.324875	0.785088
0.039	0.09906	0.0108499	2000	12.461	13.347361	0.933608
0.044	0.11176	0.0122410	1959	14.420	13.366158	1.078859
0.054	0.13716	0.0150230	4017	18.437	13.403910	1.375509
0.068	0.17272	0.0189179	4015	22.452	13.457123	1.668425
0.087	0.22098	0.0242037	4014	26.466	13.530020	1.956109
0.115	0.2921	0.0319934	4000	30.466	13.638898	2.233773
FALLA						

Figura 66. Prueba de compresión no confinada para E8-30 repetición 1.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	20/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-08-30-EZ-R2			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	M2					
W Recipiente	34.7	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	119.9	gr				
W suelo seco + recipiente	98.3	gr				
W Agua	21.6	gr				
W suelo húmedo	85.2	gr				
W suelo seco	63.6	Contenido de Humedad %			34.0%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.08			Peso muestra	200.8	
Área inicial	13.07			Peso volumétrico	1.67	
Altura inicial	9.20			Relación H/D	2.26	
Volumen inicial	120.32					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida ( $A_0/1-\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.074052	0
0.002	0.00508	0.00055197	251	0.251	13.0812725	0.0191877
0.006	0.01524	0.00165592	457.2	0.708	13.0957375	0.0540787
0.011	0.02794	0.00303586	526.9	1.235	13.1138638	0.0941828
0.015	0.0381	0.00413980	1007.2	2.242	13.1284010	0.1707976
0.018	0.04572	0.00496777	1000.6	3.243	13.1393251	0.2468087
0.02	0.0508	0.00551974	1007.6	4.251	13.1466179	0.3233151
0.023	0.05842	0.00634770	1080	5.331	13.1575723	0.4051279
0.026	0.06604	0.00717566	1000	6.331	13.1685450	0.4807289
0.029	0.07366	0.00800362	988.1	7.319	13.1795360	0.5553003
0.034	0.08636	0.00938356	1134.8	8.453	13.1978952	0.6405112
0.039	0.09906	0.01076349	2007.8	10.461	13.2163056	0.7915374
0.049	0.12446	0.01352336	2000	12.461	13.2532809	0.9402351
0.055	0.1397	0.01517928	1959	14.420	13.2755656	1.0862211
0.068	0.17272	0.01876711	4017	18.437	13.3241070	1.3837475
0.091	0.23114	0.02511481	4015	22.452	13.4108633	1.6741801
0.11	0.2794	0.03035857	4014	26.466	13.4833883	1.9628746
FALLA						

Figura 67. Prueba de compresión no confinada para E8-30 repetición 2.

COMPRESIÓN SIMPLE						
Obra	Investigación MIC			Fecha moldeo	22/10/2023	
Ubicación	Stanza Granada			Fecha ensayo	20/11/2023	
Nombre de la muestra	SR-08-30-EZ-R3			Profundidad	2	metros.
Descripción de la muestra	Arcilla alta plasticidad, color oscura con enzimas compactada a la humedad óptima					
DETERMINACIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD						
Recipiente No.	SS-Q					
W Recipiente	34.2	gr				
W suelo húmedo+ recipiente	119.5	gr				
W suelo seco + recipiente	98.8	gr				
W Agua	20.7	gr				
W suelo húmedo	85.3	gr				
W suelo seco	64.6		Contenido de Humedad %		32.0%	
ESFUERZO A COMPRESIÓN SIMPLE						
Diámetro Inicial	4.09			Peso muestra	202.8	
Área inicial	13.14			Peso volumétrico	1.68	
Altura inicial	9.21			Relación H/D	2.25	
Volumen inicial	120.96					
Lectura micrómetro (pulg)	Deformación acumulada (cm)	$\epsilon = \delta/L$	Incremento de Carga (gr)	Carga (kg)	Área corregida (Ao/1- $\epsilon$ )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0	13.138219	0
0.001	0.00254	0.00027589	251	0.251	13.1418447	0.0190993
0.005	0.0127	0.00137944	457.2	0.708	13.1563674	0.0538294
0.01	0.0254	0.00275887	526.9	1.235	13.1745659	0.0937488
0.015	0.0381	0.00413831	1007.2	2.242	13.1928149	0.1699637
0.018	0.04572	0.00496597	1000.6	3.243	13.2037886	0.2456038
0.02	0.0508	0.00551774	1007.6	4.251	13.2111145	0.3217367
0.023	0.05842	0.00634540	1080	5.331	13.2221187	0.4031502
0.026	0.06604	0.00717306	1000	6.331	13.2331412	0.4783823
0.029	0.07366	0.00800072	988.1	7.319	13.2441821	0.5525898
0.034	0.08636	0.00938016	1134.8	8.453	13.2626245	0.6373852
0.039	0.09906	0.01075959	2007.8	10.461	13.2811185	0.7876746
0.049	0.12446	0.01351846	2000	12.461	13.3182615	0.9356476
0.055	0.1397	0.01517379	1959	14.420	13.3406472	1.0809221
0.085	0.2159	0.02345040	4017	18.437	13.4537140	1.3704171
0.113	0.28702	0.03117524	4015	22.452	13.5609859	1.6556466
FALLA						

Figura 68. Prueba de compresión no confinada para E8-30 repetición 3.