

**COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN IÓNICA CON OTROS
MÉTODOS REALIZADOS EN LA UPB**

SHAMIR JOHANES BENITEZ MEDINA 000222025

CARLOS DAVID ROJAS DURAN 000201715

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

**COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN IÓNICA CON OTROS
MÉTODOS REALIZADOS EN LA UPB**

Shamir Johanes Benitez Medina 000222025

Carlos David Rojas Duran 000201715

Proyecto de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil

Director de Proyecto

MSc. Ing. Julian Galvis

Docente facultad de ingeniería civil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 2019

DEDICATORIA

Queremos dedicar este gran logro profesional en nuestras vidas a Dios, quien nos llenó de sabiduría y salud para alcanzar este logro tan importante a nivel profesional, a nuestras familias quienes fueron un apoyo incondicional es este proyecto de vida, a nuestros profesores quienes nos brindaron apoyo académico para lograr este objetivo y todos los amigos y compañeros quienes nos acompañaron día a día.

AGRADECIMEINTOS

Primeramente, agradecerle a Dios por este logro profesional tan importante que hemos alcanzado, a nuestros padres por el apoyo incondicional en cada uno de los baches por los que hemos sabido pasar para alcanzar esta meta, a la Universidad Pontificia Bolivariana por formarnos ética y profesionalmente, a nuestros profesores quienes nos brindaron un apoyo y seguimiento académico excelente y a todas las personas que hicieron parte de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	18
2	DELIMITACION DEL PROBLEMA	19
3	JUSTIFICACION	20
4	OBJETIVOS	21
4.1	OBJETIVO GENERAL	21
4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
5	MARCO TEORICO	22
5.1	ESTABILIZACION DE SUELOS	22
5.2	METODOS DE ESTABILIZACIÓN	23
5.2.1	ESTABILIZACION MECANICA	23
5.2.2	ESTABILIZACION FISICA	24
5.2.3	ESTABILIZACION FISICO-QUIMICA	24
5.2.4	ESTABILIZACION QUIMICA.....	25
5.2.5	ESTABILIZACION MEDIANTE BioCEC.....	26
6	METODOLOGIA	28
6.1	OBTENCIÓN DE LA MUESTRA.....	29
6.2	PREPARACION DE LA MUESTRA PARA ENSAYOS	31
6.3	CARACTERIZACIÓN DE SUELO NATURAL	32
6.3.1	GRANULOMETRIA.....	32
6.3.2	LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO	33
6.3.3	LIMITE DE CONTRACCION	34
6.3.4	PROCTOR MODIFICADO	35
6.3.5	CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR	37
6.3.6	CORTE DIRECTO.....	40
7	RESULTADOS SUELO NATURAL	41
7.1	GRANULOMETRIA	41
7.2	LIMITES DE ATTERBERG.....	44
7.1.1	LIMITE LIQUIDO	44
7.1.2	LIMITE PLASTICO.....	46
7.3	LIMITE DE CONTRACCION	48
7.4	PROCTOR MODIFICADO	48
7.5	CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR.....	51

7.5.1	CBR (Sumergido).....	51
7.5.2	CBR (Sin Sumergir).....	52
7.6	CORTE DIRECTO SUELO NATURAL.....	54
7.7	COMPRESION SIMPLE	57
8	RESULTADOS SUELO ESTABILIZADO CON BIOCEC	61
8.1	DOSIFICACION BIOCEC	63
8.2	PREPARACION SUELO MEJORADO CON BIOCEC	64
8.3	SUELO ESTABILIZADO CON BioCEC 5.5%	68
8.3.1	LIMITES DE ATTERBERG	68
8.3.2	LIMITE DE CONTRACCION	71
8.3.3	PROCTOR MODIFICADO	72
8.3.4	CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR.....	74
8.3.5	CORTE DIRECTO.....	76
8.3.6	COMPRESION SIMPLE.....	79
8.4	SUELO ESTABILIZADO CON 6% BioCEC.....	83
8.4.1	LIMITES DE ATTEBERG	83
8.4.2	LIMITE DE CONTRACCION	86
8.4.3	PROCTOR MODIFICADO	87
8.4.4	CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR.....	89
8.4.5	CORTE DIRECTO.....	91
8.4.6	COMPRESION SIMPLE.....	93
8.5	ESTABILIZACION DEL SUELO CON 6.6% BioCEC.....	97
8.5.1	LIMITES DE ATTERBERG	97
8.5.2	LIMITE DE CONTRACCION	101
8.5.3	PROCTOR MODIFICADO	101
8.5.4	CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR.....	104
8.5.5	CORTE DIRECTO.....	105
8.5.6	COMPRESION SIMPLE.....	108
9	ANALISIS DE RESULTADOS SUELO NATURAL (CL) MEJORADO CON BIOCEC	112
9.1	LIMITES DE ATTERBERG	112
9.1.1	LIMITE LIQUIDO	112
9.1.2	LIMITE PLASTICO.....	112

9.2	INDICE DE PLASTICIDAD	113
9.3	LIMITE DE CONTRACCION	114
9.4	PROCTOR MODIFICADO	115
9.5	CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR.....	117
9.6	COMPRESION SIMPLE.....	118
9.7	CORTE DIRECTO	120
10	ANALISIS MEDIANTE COMPARATIVOS A LOS RESULTADOS DE LOS METODOS DE ESTABILIZACION	122
10.1	LIMITE LIQUIDO.....	122
10.2	LIMITE PLASTICO	123
10.3	INDICE DE PLASTICIDAD	123
10.4	LIMITE DE CONTRACCION	124
10.5	PROCTOR MODIFICADO	125
10.6	COMPRESION SIMPLE	127
10.7	CORTE DIRECTO	129
11	COMPARACION DE LOS METODOS DE ESTABILIZACION REALIZADOS EN LA UPB Y METODO DE ESTABILIZACION CON BIOCEC	130
11.1	PROCESO CONSTRUCTIVO.....	130
11.2	ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS.....	132
12	CONCLUSIONES	137
13	RECOMENDACIONES	139
14	BIBLIOGRAFIA	141

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ficha técnica BioCEC	27
Tabla 2 Corte directo.....	40
Tabla 3 Granulometría muestra 1	41
Tabla 4 Granulometría muestra 2	42
Tabla 5 Granulometría muestra 3	43
Tabla 6 Limite plástico muestra 1.....	46
Tabla 7 Limite plástico muestra 2.....	46
Tabla 8 Limite plástico muestra 3.....	46
Tabla 9 Clasificación suelo	47
Tabla 10 resumen tipo de suelo natural.....	47
Tabla 11 Limite de contracción	48
Tabla 12 Proctor Muestra 1	48
Tabla 13 Proctor Muestra 2	49
Tabla 14 Proctor Muestra 3	50
Tabla 15 Resumen Proctor suelo natural	51
Tabla 16 Datos finales CBR.....	51
Tabla 17 Densidad seca vs CBR.....	53
Tabla 18 Datos finales CBR sin sumergir	53
Tabla 19 resumen CBR´s suelo natural.....	54
Tabla 20 Corte directo muestra 1.....	54
Tabla 21 Resultados corte directo Muestra 1	55
Tabla 22 Corte directo muestra 2.....	55
Tabla 23 Resultados corte directo Muestra 2	56
Tabla 24 resumen Corte directo.....	56
Tabla 25 Compresión simple suelo natural Muestra 1	57
Tabla 26 Compresión simple suelo natural Muestra 2.....	58
Tabla 27 Compresión simple suelo natural Muestra 3.....	59
Tabla 28 Promedio compresión simple suelo natural	60
Tabla 29 Limite plástico 5.5% muestra 1.....	70
Tabla 30 Limite plástico 5.5% muestra 2.....	70

Tabla 31 Limite plástico 5.5% muestra 3.....	70
Tabla 32 Resultado limites 5.5% BioCEC	71
Tabla 33 Limite de contracción 5.5% BioCEC	71
Tabla 34 Proctor 5.5% BioCEC muestra 1	72
Tabla 35 Proctor 5.5% BioCEC muestra 2	72
Tabla 36 Promedio Proctor suelo BioCEC 5.5 %.....	73
Tabla 37 Datos finales CBR	74
Tabla 38 Datos finales CBR	75
Tabla 39 promedio CBR´s suelo BioCEC 5.5%.....	76
Tabla 40 Corte directo 5.5% BioCEC muestra 1.....	76
Tabla 41 Corte directo 5.5% muestra 1.....	77
Tabla 42 Resultados corte directo 5.5 % BioCEC muestra 1.....	77
Tabla 43 Corte directo 5.5 % BioCEC muestra 2.....	77
Tabla 44 Resultados corte directo muestra 2.....	78
Tabla 45 Resumen corte directo 5.5 % BioCEC	78
Tabla 46 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 1	79
Tabla 47 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 2.....	80
Tabla 48 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 3.....	81
Tabla 49 Promedio compresión simple 5.5% BioCEC.....	82
Tabla 50 Limite plástico 6% Muestra 1	85
Tabla 51 Limite plástico 6% Muestra 2	85
Tabla 52 Limite plástico 6% Muestra 3	85
Tabla 53 Resultado limites 6% BioCEC	86
Tabla 54 Limite de contracción	86
Tabla 55 Proctor 6% Muestra 1	87
Tabla 56 Proctor 6% Muestra 2.....	87
Tabla 57 promedio proctor suelo BioCEC 6.0 %	88
Tabla 58 Datos finales CBR.....	89
Tabla 59 Datos finales CBR.....	90
Tabla 60 CBR Promedio 6.0 %	91
Tabla 61 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 1.....	91

Tabla 62 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 1.....	92
Tabla 63 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 2.....	92
Tabla 64 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 2.....	93
Tabla 65 Resumen corte directo 6.0 % BioCEC	93
Tabla 66 Compresión simple 6.0 % BioCEC muestra 1	93
Tabla 67 Compresión simple 6.0 % BioCEC muestra 2.....	94
Tabla 68 Compresión simple 6.0% BioCEC muestra 3.....	96
Tabla 69 Limite plástico 6.6% muestra 1.....	99
Tabla 70 Limite plástico 6.6% Muestra 2	100
Tabla 71 Limite plástico 6.6% Muestra 3	100
Tabla 72 Resultado limites 6.6% BioCEC	100
Tabla 73 Limite de contracción	101
Tabla 74 Proctor 6.6% BioCEC muestra 1	101
Tabla 75 Proctor 6.6% BioCEC muestra 2	102
Tabla 76 Promedio Proctor 6.6% BioCEC.....	103
Tabla 77 Datos finales CBR.....	104
Tabla 78 Datos finales CBR.....	105
Tabla 79 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 1.....	105
Tabla 80 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 1.....	106
Tabla 81 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 2.....	106
Tabla 82 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 2.....	107
Tabla 84 Resumen corte directo 6.6 % BioCEC	107
Tabla 85 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 1	108
Tabla 86 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 2.....	109
Tabla 87 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 3.....	110
Tabla 88 Promedio compresión simple 6.6 % BioCEC.....	111
Tabla 89 Comparación métodos constructivos.....	131
Tabla 90 Presupuesto Cemento	133
Tabla 91 Presupuesto Cal.....	134
Tabla 92 Presupuesto BioCEC	135
Tabla 93 Costos de ejecución por m2	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Método constructivo BioCEC	28
Figura 2 Granulometría muestra 1	42
Figura 3 Granulometría muestra 2	42
Figura 4 Granulometría muestra 3	43
Figura 5 Limite liquido muestra 1	44
Figura 6 Limite liquido muestra 2	45
Figura 7 Limite liquido muestra 3	45
Figura 8 Proctor Muestra 1	49
Figura 9 Proctor Muestra 2	49
Figura 10 Proctor Muestra 3	50
Figura 11 Densidad seca Vs CBR (sumergido)	51
Figura 12 Densidad seca vs CBR (sin sumergir) muestra 1	52
Figura 13 Densidad seca vs CBR (sin sumergir) muestra 2	53
Figura 14 Corte directo muestra 1	55
Figura 15 Corte directo muestra 2	56
Figura 16 Compresión simple suelo natural Muestra 3	58
Figura 17 Compresión simple suelo natural Muestra 2	59
Figura 18 Compresión simple suelo natural Muestra 3	60
Figura 19 Limite liquido 5.5% muestra 1	68
Figura 20 Limite liquido 5.5% muestra 2	69
Figura 21 Limite liquido 5.5% muestra 3	69
Figura 22 Proctor 5.5% BioCEC muestra 1	72
Figura 23 Proctor 5.5% BioCEC muestra 2	73
Figura 24 Densidad seca Vs CBR	74
Figura 25 Densidad seca Vs CBR	75
Figura 26 Corte directo 5.5% BioCEC muestra 2	78
Figura 27 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 1	80
Figura 28 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 2	81
Figura 29 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 3	82
Figura 30 Limite liquido 6% muestra 1	83

Figura 31 Limite liquido 6% muestra 2	84
Figura 32 Limite liquido 6% muestra 3	84
Figura 33 Proctor 6% Muestra 1.....	87
Figura 34 Proctor 6% Muestra 2.....	88
Figura 35 Densidad seca Vs CBR.....	89
Figura 36 Densidad seca Vs CBR.....	90
Figura 37 Corte directo 6.0% BioCEC muestra 1	91
Figura 38 Corte directo 6.0% BioCEC muestra 2	92
Figura 39 Compresión simple muestra 1	94
Figura 40 Compresión simple muestra 2	95
Figura 41 Compresión simple muestra 3	96
Figura 42 Limite liquido 6.6% muestra 1	98
Figura 43 Limite liquido 6.6% muestra 2	98
Figura 44 Limite liquido 6.6% muestra 3	99
Figura 45 Proctor 6.6% BioCEC muestra 1	102
Figura 46 Proctor 6.6% BioCEC muestra 2	103
Figura 47 Densidad seca Vs CBR.....	104
Figura 48 Densidad seca Vs CBR.....	105
Figura 49 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 1	106
Figura 50 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 2	107
Figura 51 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 1.....	109
Figura 52 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 2.....	110
Figura 53 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 3.....	111
Figura 54 Análisis limite liquido	112
Figura 55 Análisis limite plástico	113
Figura 56 Análisis índice de plasticidad	114
Figura 57 Análisis límite de contracción	115
Figura 58 Análisis Proctor- humedad optima.....	116
Figura 59 Análisis Proctor- densidad.....	116
Figura 60 Análisis CBR	118
Figura 61 Análisis compresión simple-Esfuerzo Máximo	119

Figura 62 Análisis compresión simple-Deformación Máxima	120
Figura 63 Análisis corte directo-ángulo de fricción	121
Figura 64 Análisis de corte directo-cohesión	121
Figura 65 Comparación métodos de estabilización -límite líquido	122
Figura 66 Comparación métodos de estabilización -límite plástico	123
Figura 67 Comparación métodos de estabilización - índice plástico.....	124
Figura 68 Comparación métodos de estabilización -límite de contracción	125
Figura 69 Comparación métodos de estabilización -humedad optima	126
Figura 70 Comparación métodos de estabilización -densidad máxima seca	126
Figura 71 Comparación métodos de estabilización -esfuerzo máximo.....	127
Figura 72 Comparación métodos de estabilización -deformación	128
Figura 73 Comparación métodos de estabilización -cohesión	129
Figura 74 Comparación métodos de estabilización -Angulo de fricción.....	130

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1 Selección del suelo	30
Fotografía 2 Obtención de la muestra	31
Fotografía 3 Cuarteo muestra	32
Fotografía 4 Granulometría	33
Fotografía 5 Maquina de Casagrande	34
Fotografía 6 Limite de contracción.....	35
Fotografía 7 Proctor	36
Fotografía 8 Proctor estándar	36
Fotografía 9 Proctor estándar	37
Fotografía 10 Preparación muestra CBR	38
Fotografía 11 CBR.....	38
Fotografía 12 CBR.....	39
Fotografía 13 Ensayo CBR.....	39
Fotografía 14 Corte Directo preparación espécimen	41
Fotografía 15 BioCEC presentación	61
Fotografía 16 Adición del estabilizante BioCEC	64
Fotografía 17 Adición del suelo	65
Fotografía 18 Mezcla solución más suelo	66
Fotografía 19 Decantación del suelo más solución	66
Fotografía 20 Filtración agua	67

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN IÓNICA CON OTROS MÉTODOS REALIZADOS EN LA UPB

AUTOR(ES): Carlos David Rojas Duran
Shamir Benitez Medina

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Julian Andre Galvis Florez

RESUMEN

Este proyecto de grado está encaminado al estudio del mejoramiento de un suelo arcilloso de baja plasticidad (CL), por medio de la estabilización iónica utilizando un producto líquido químico llamado BioCEC, con el fin de demostrar un mejoramiento en sus propiedades mecánicas. Para la ejecución de este proyecto se usaron tres dosificaciones de reactivo químico BioCEC (5.5%, 6.0% Y 6.6 %) las cuales fueron aplicadas al suelo natural (CL) , dando como resultados una mejoría importante en cuanto al aumento de la capacidad de soporte y disminución en la plasticidad del material, debido a una mayor interacción entre las partículas del suelo con el BioCEC ,que reduce la entrada de cantidades importantes de agua , todos los resultados fueron obtenidos por medio de los ensayos de Limites de plasticidad , Limite de contracción , Proctor modificado , Compresión simple ,Corte directo y CBR , cumpliendo con los parámetros del INVIAS 2013.Se tomaron los resultados obtenidos de los métodos de estabilización con suelo-cal y suelo-cemento contrastando la efectividad de estos métodos frente a la estabilización iónica , Así mismo se realizó una comparativa en cuanto a los procesos constructivos y rentabilidad donde se concluye que la estabilización iónica mediante BioCEC disminuye la plasticidad y aumenta considerablemente la capacidad de soporte del suelo en un 75% ,además de ser el método más económico en cuanto a costos de materiales como de ejecución.

PALABRAS CLAVE:

Estabilización Iónica, Suelo ,Mejoramiento

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: COMPARISON OF THE IONIC STABILIZATION METHOD WITH OTHER METHODS USED IN THE UPB

AUTHOR(S): Carlos David Rojas Duran
Shamir Benitez Medina

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Julian Andre Galvis Florez

ABSTRACT

This degree project is aimed at the study of the improvement of a low plasticity clay soil (CL), through ionic stabilization using a chemical liquid product called BioCEC, in order to demonstrate an improvement in its mechanical properties. For the execution of this project, three dosages of BioCEC chemical reagent (5.5%, 6.0% and 6.6%) were used, which were applied to natural soil (CL), resulting in a significant improvement in terms of increased support capacity, and decrease in the plasticity of the material, due to a greater interaction between soil particles with the BioCEC, which reduces the entry of significant quantities of water, all the results were obtained through the tests of Plasticity limits, Contraction limit, Modified Proctor, Simple Compression, Direct Cut and CBR, complying with the parameters of INVIAS 2013. The results obtained from the stabilization methods with soil-lime and soil-cement were taken contrasting the effectiveness of these methods against ionic stabilization. Likewise, a comparison was made regarding the construction processes and profitability where it is concluded that the ionic stabilization through BioCEC decreases plasticity and considerably increases the soil support capacity by 75%, in addition to being the most economical method in terms of materials and execution costs.

KEYWORDS:

Ionic Stabilization, Soil, Improvement

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1 INTRODUCCION

En Colombia existen diferentes tipos de suelos, existiendo así en el medio de la construcción gran variedad de estos que en algunas ocasiones no cumplen con las propiedades físicas y mecánicas para un óptimo desarrollo de los diferentes tipos de obras existentes. Es por esto por lo que requieren la utilización de diversos métodos de estabilización de suelos, en esta variedad se encuentran los estabilizantes químicos los cuales no son usados con mucha frecuencia, pero aportan un mejoramiento óptimo y una disminución de costos.

Este proyecto de grado está encaminado al estudio del mejoramiento de un suelo de baja plasticidad (CL) los cuales presentan baja resistencia y alta deformabilidad, por medio de la estabilización química, con el fin de demostrar mejoramiento en su estabilidad y propiedades mecánicas.

La estabilización es producto de la mezcla del suelo natural con un químico llamado BioCEC en donde se evaluará su comportamiento con porcentajes de (5%,6%, 6.6%) y así poder llegar a comparar sus resultados con respecto al suelo natural. Evaluando su efectividad y ventajas.

2 DELIMITACION DEL PROBLEMA

Colombia posee diversa variedad de tipos de suelos, sin embargo, no todos presentan buenas propiedades por lo que se hace necesario una implementación de métodos para el mejoramiento y estabilización de suelos, actualmente existen diferentes técnicas; en la universidad pontificia bolivariana se han realizado estudios e investigaciones sobre de suelo-cal y suelo-cemento. En este caso se pretende evaluar y realizar un análisis detallado del comportamiento de un suelo igual al de los estudios de trabajos de grado de la UPB extraídos del municipio de Girón departamento de Santander ejecutando una estabilización iónica mediante el uso de un producto químico líquido nuevo en el mercado llamado BioCEC.

La estructura vial es un factor de progreso, desarrollo social y económico. El tratamiento de este suelo con BioCEC dará a conocer una serie de ventajas las cuales permitirán una consolidación de caminos y carreteras enfocada a usarse en vías secundarias y terciarias, que presentan un estado de transitabilidad deplorable con bajos costos y reducción de impacto ambiental debido a una menor explotación de canteras y ríos.

3 JUSTIFICACION

Actualmente la infraestructura vial de nuestro país no es suficiente para abastecer toda la totalidad del territorio nacional, dejando en el olvido a pueblos, veredas y corregimientos aislados de las grandes ciudades afectando la transitabilidad de las personas como de los productos generados por los agricultores y comerciantes. Para dar una solución a esto, se ha implementado el uso de placa huella las cuales ayudan a la intercomunicación terrestre de la población rural, pero se identifican ciertos problemas en cuanto a la construcción, operación, conservación y mantenimiento de la infraestructura por ser necesario un aporte de los recursos económicos por parte del gobierno para el desarrollo de estas obras. Las cuales por su alto costo quedan en el olvido.

Para esta necesidad se precisa implementar una alternativa de mejoramiento de la calidad de vida de una población con bajo costo y con buenos resultados mediante la estabilización iónica con un químico líquido en los suelos.

Este proyecto busca establecer la efectividad de la estabilización iónica de los suelos con BioCEC, si los resultados de este método son los deseados, se estaría dando a conocer una nueva alternativa con beneficios económicos, prácticos y técnicos

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Comparar los resultados realizados a un suelo mejorado con el método de estabilización iónica frente a resultados obtenidos con anteriores investigaciones realizadas en la Universidad Pontificia Bolivariana empleando el mismo tipo de suelo con métodos de estabilización de suelo-cal y suelo-cemento cumpliendo con los parámetros del Instituto Nacional de Vías.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar las características mecánicas del suelo mejorado con la estabilización iónica empleando BioCEC.
- Proponer una variación porcentual del valor de dosificación del producto BioCEC establecida por el fabricante, con el fin de evaluar un mejor resultado en el mejoramiento de las características mecánicas del suelo.
- Contrastar el proceso constructivo y de rentabilidad del método (MEI), realizando una comparación respecto a los métodos suelo-cal y suelo-cemento.

5 MARCO TEORICO

5.1 ESTABILIZACION DE SUELOS

La estabilización de un suelo es un proceso en donde suelos vírgenes son sometidos a cierto tratamiento o manipulación para poder aprovechar todas las cualidades que este tiene, obteniendo una mejoría en cuanto a su firmeza, estabilidad y durabilidad; capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima severas. Por ende, una característica del suelo es ser susceptible a los cambios de volumen y resistencia, los cuales causarían una rugosidad severa y deterioro de una estructura de pavimento, generando agrietamientos y disminución de la calidad de marcha cuando se combina con el tráfico pesado.

La estabilización de suelos suele ser realizada por tres razones:

- Como proceso de construcción para secar suelos muy húmedos y facilitar la compactación de las capas superiores: en este caso, el suelo estabilizado generalmente no se considera como una estructura Capa en el proceso de diseño del pavimento.
- Para fortalecer un suelo débil y restringir el potencial de cambio de volumen de un material altamente plástico. o suelo compresible: en este caso, al suelo modificado generalmente se le da una cierta estructura valor en el proceso de diseño del pavimento.
- Reducir la susceptibilidad a la humedad de suelos de grano fino. [8]

Al hablar de la estabilidad del suelo hacemos referencia a una corrección en su deficiencia natural, Para obtener dicha estabilización se deben mejorar las diferentes propiedades que este tiene, a continuación, se describen cada una de ellas.

- Resistencia. El incremento de resistencia aumenta la estabilidad y la capacidad de carga.
- Estabilidad del volumen. Proporciona el control de los procesos en donde el suelo presenta un colapso causado por los cambios de humedad.
- Durabilidad. El incremento de durabilidad aumenta la resistencia a la erosión, responde de manera más eficaz a los cambios climáticos y al uso del tráfico.
- Permeabilidad. La reducción de la permeabilidad y de la circulación de agua, mejora la estabilidad. [9]

A continuación, se presentan los diferentes métodos de estabilización existentes para el mejoramiento del suelo

5.2 METODOS DE ESTABILIZACIÓN

Cuando se habla de suelos se hace énfasis en el uso que tendrán ya sea en construcción de vías, edificaciones y cualquier otra estructura etc. Los cuales poseen ciertas características y propiedades de cada suelo natural ya mencionadas según el tipo, ya sea arcilla, limo, arena, grava etc.

Generalmente, algunas de estas características y propiedades pueden ser modificadas según su uso en la construcción teniendo en cuenta que estas alteraciones deben cumplir con requisitos de la ingeniería específicos. Existen diferentes métodos de estabilización que mejoran estas propiedades: [10]

5.2.1 ESTABILIZACION MECANICA

Se realiza por medio del proceso de compactación. La compactación mejora las propiedades del suelo y en particular la densificación del suelo, el aumento de resistencia y la capacidad

de carga. [11] El suelo en su estado suelto es llevado a Un estado denso por el suministro de energía de compactación. Hay dos tipos Técnicas de compactación de suelo: compactación estática y dinámica. Llevando a la reducción de la porosidad y otras propiedades dependiendo la composición del suelo, su contenido de agua de moldeo y la energía de compactación suministrada [10].

5.2.2 ESTABILIZACION FISICA

La estabilización mecánica es un método económico para estabilizar un suelo, consiste en la mezcla de dos o más suelos con características diferentes, a veces con Materiales inertes como arena y grava, Cuando estos se ajustan granulométricamente buscando aumentar la fricción entre las partículas, la cohesión de la masa y la impermeabilidad. Llevándolos a obtener la clasificación deseada generando [10]

5.2.3 ESTABILIZACION FISICO-QUIMICA

Se realiza en suelos con gran cantidad de finos plásticos, como limos y arcillas especialmente. Si el suelo es tratado con hidróxido de calcio produce en la masa de suelo resultante un intercambio iónico y cementación. Generalmente, con este tipo de estabilización se busca reducir la plasticidad del suelo, aumentar su resistencia, trabajabilidad y estabilidad volumétrica. [11]

5.2.3.1 ESTABILIZACION CON CAL

Las técnicas de estabilización de la cal son usadas generalmente para suelos arcillosos, Para controlar la hinchazón y la contracción, Cuando la cal es mezclada con el suelo, Los minerales arcillosos presentes en el suelo reaccionan con la cal, Las reacciones conducen a la formación de un gel insoluble en agua de silicato y silicato-aluminatos, y (con el tiempo)

este gel finalmente cristaliza en hidratos de silicato de calcio, aluminatos de calcio, etc. [10].

5.2.3.2 ESTABILIZACION CON CEMENTO

La estabilización del cemento es ideal para suelos de grano grueso y se utiliza para mejorar la resistencia (especialmente en condiciones saturadas), resistencia contra Erosión por lluvia y daños mecánicos.

Los principales factores que afectan a los suelos estabilizados con cemento son las propiedades del suelo, el porcentaje de cemento usado, grado de compactación alcanzado para el producto, el período de curado y su temperatura. La fuerza del suelo-cemento aumenta con el aumento del contenido de cemento, densidad, período de curado y Temperatura de curado [10]

5.2.4 ESTABILIZACION QUIMICA

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas avaladas y cuyo uso involucra el intercambio iónico capaz de reducir la cantidad de agua absorbida de las partículas de arcilla, mejorando su comportamiento mecánico al disminuir la plasticidad y su expansión. Sus moléculas pueden cambiar fácilmente cationes débiles, como lo son los del agua y otros materiales e intercambiarlos de forma permanente asimismo los sitios iónicos libres puede ser ocupado por el líquido estabilizador.

El tratamiento del suelo con este estabilizador tiene la capacidad de accionar de forma química necesaria para rechazar el agua de los minerales de arcilla. Después de que las reacciones han tenido lugar, la compactación puede ser lograda con un mínimo esfuerzo mecánico. Las partículas de arcilla tratadas quedan completamente unidas de forma cerrada.

Esto es debido a la eliminación de la capa de agua adsorbida, que permite un acercamiento mayor de las partículas de arcilla, dando por resultado un contacto más íntimo entre unas y otras.

La densidad adquirida, sumada a la no capacidad de mezclarse con el agua, presenta ahora el material, evita que el agua pueda entrar en cantidades importantes en el sistema, produciendo un aumento en la capacidad de soportar cargas de la capa tratada por mayor fricción entre partículas [9].

5.2.5 ESTABILIZACION MEDIANTE BioCEC

El BioCEC es un producto químico capaz de estabilizar de forma iónica los suelos, este realiza un proceso de asociación de partículas por medio de unos ionizantes que contienen elementos intercambiadores, se puede decir que al incorporar este medio aceitoso miscible en agua, su función principal es llegar a un sellado de las partículas del suelo natural estabilizado. [12].

5.2.5.1 CARACTERÍSTICAS

El estabilizante BioCEC tienen como función liberar el contenido de agua que se aloja por adsorción química en cada una de las partículas de suelo, este proceso lo hace mediante el rompimiento de los enlaces electroquímicos que consigue, generando así una sustitución por iones más fuertes, equipados por el estabilizador, Simultáneamente ,con ello cancela la bipolaridad de las partículas, comprimiendo los espacios antes ocupados por el agua y que en estado molecular es percolada o evaporada. [12].

Tabla 1 Ficha técnica BioCEC

BIOCEC	RESULTADOS
Sólidos activos (secado a 110°C máximo)	Min. 23%
PH	1.0+/- 0.15
Índice de viscosidad cps (a 25°C)(coaxial Rion-Rotor 3- Bajo rango, Modelo VA-04	600+/- 100
Peso específico a 25°C	1,0+/- 0,15
Estado Físico	Líquido
Color	Rojizo
Totalmente dispersable en agua	
No inflamable	
No corrosivo	
No produce vapores dañinos	

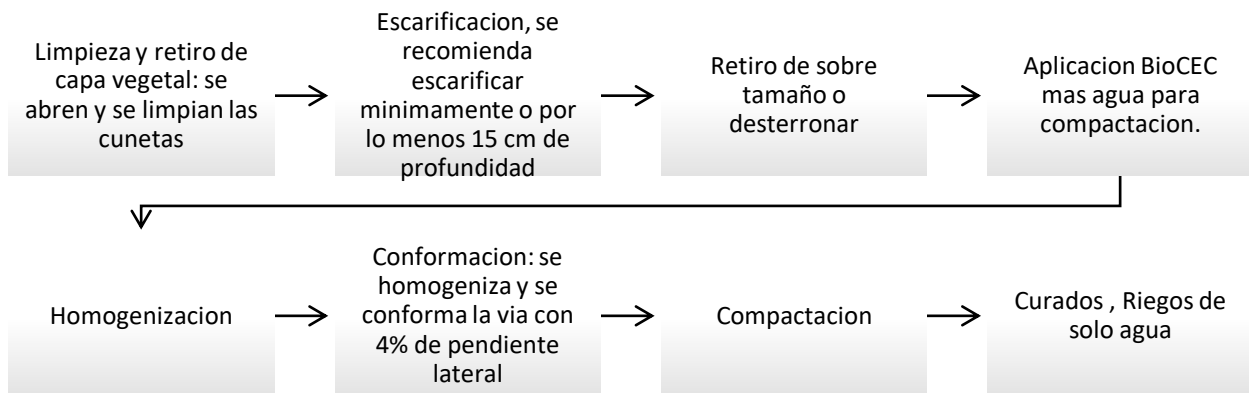
Fuente. Plexus.com [12]

5.2.5.2 USO Y APLICACIONES

- El BioCEC cuenta con diversas aplicaciones como lo son la consolidación de vías, caminos y rutas de solo suelo virgen, especialmente está diseñado para vías terciarias nuevas o existentes.
- Otra funcionalidad con la cual se cuenta es para el mejoramiento de bases, subbases y subrasantes de suelos que contengan como mínimo 5% de arcilla en su contenido, disminuyendo drásticamente los costos en las estructuras de pavimento.
- Aplica de igual forma para el mejoramiento de las vías terciarias, estabilización de caminos rurales, puede ser usado hacia lugares donde se explotan minerales y petróleo
- Puede ser usado para la ejecución y construcción de terraplenes [12].

5.2.5.3 METODO CONSTRUCTIVO

Figura 1 Método constructivo BioCEC



Fuente. Plexus.com [12]

6 METODOLOGIA

En el desarrollo experimental de este trabajo de grado, se realizó una estabilización iónica a un suelo arcilloso de baja plasticidad, realizando su respectivo proceso para establecer una comparación con los métodos de estabilización suelo-cemento, suelo-cal ya experimentados en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Se consultó en manuales y sitio web pertenecientes a la empresa PLEXUS S.A quienes son los proveedores del estabilizante. Encontrando información necesaria para tomar como referencia y así llegar al desarrollo e implementación. A demás a esto se realizaron búsquedas

en trabajos de grado, revistas, artículos de investigación y se encontró información de algunos métodos de estabilización química pero no información similar a nuestro proyecto. Sin embargo, estos fueron de ayuda para llegar al objetivo de comparación con los demás trabajos de grado.

Fue necesario el desarrollo detallado de cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio. Siguiendo la norma de ensayo de materiales del instituto nacional de vías INVIAS 2013. Con la finalidad de cumplir con la caracterización del suelo y comportamiento del método

6.1 OBTENCIÓN DE LA MUESTRA

Este trabajo de grado se basa en una comparación con otra clase de estabilizante de suelo, es así como el material requería cumplir con ciertas características específicas similares al suelo usado en las demás tesis con las cuales se realizarán dichas comparaciones. Para la obtención de la muestra fue necesaria la comunicación con los autores de los proyectos de grado de los cuales serían la base para el desarrollo de este proyecto.

Para llegar a la comparación de los proyectos era necesario extraer las muestras en la misma locación de los anteriores trabajos para esto fue necesario acudir a Girón, Santander, llegando a ser imposible extraerla del mismo lugar por encontrarse en un sector privado. Por esta razón se empezó la búsqueda de un suelo con iguales características arcilla de baja plasticidad CL, pero en otra locación.

La primera búsqueda de la muestra en la que se pensó fue en el terreno de Universidad Pontificia Bolivariana, se procedió a sacar una muestra de este suelo y evaluarla en el laboratorio de forma correcta, los resultados obtenidos determinaron que dicha muestra no cumplía con las características necesarias para el desarrollo de este proyecto.

La segunda muestra obtenida fue de un terreno en Barrancabermeja esta prueba fue facilitada por una ladrillera ubicada en esta ciudad, al ser sometida a los mismos estudios de la primera prueba, da como resultado una arcilla de alta plasticidad, pero no cumpliendo con la clasificación de suelo deseada lo cual hizo que esta muestra fuera descartada.

Fotografía 1 Selección del suelo



Fuente. Los autores

La tercera muestra se encontró un terreno en el área metropolitana de Bucaramanga, ubicado en Santander de dicho terreno se procedió a tomar la muestra No.3 para ser sometida a los mismos estudios que se le realizaron a la muestra No.1 y 2 los cuales determinarían las características necesarias que se estaban buscando, después de realizar uno a uno los pasos correctamente ejecutados, el resultado de esta muestra No.3 dio un suelo apto el cual contaba con la clasificación de baja plasticidad y con los mismos datos requeridos para la comparación con los otros trabajos de grado.

Al obtener el suelo deseado para la elaboración de nuestro proyecto, se procedió a realizar todos los ensayos requeridos en el laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Fotografía 2 Obtención de la muestra



Fuente. Los autores

6.2 PREPARACION DE LA MUESTRA PARA ENSAYOS

El suelo fue secado en su totalidad a temperatura ambiente y disgregado para obtener partículas de tamaño pasa N°4, así mismo se realiza el cuarteo de la muestra al realizar los ensayos siguiendo cada respectiva norma.

Fotografía 3 Cuarteo muestra



Fuente. Los autores

6.3 CARACTERIZACIÓN DE SUELO NATURAL

Después de ser seleccionado el suelo con el que se va a trabajar, se realizan ensayos de caracterización y otros ensayos necesarios para alcanzar los objetivos de forma satisfactoria.

6.3.1 GRANULOMETRIA

El primer paso para clasificación del suelo fue el desarrollo de granulometría siguiendo el procedimiento basado en la norma INV-123-13. Para este ensayo se tomó 1500 gr de suelo realizando cuarteo escogiendo de esas tres muestras para realizar granulometría, después realizó un lavado por el tamiz N°200 y se lleva el material retenido al horno. Una vez transcurrido el secado del suelo se dispone a pasarlo por los diferentes tamices como lo indica la norma.

Fotografía 4 Granulometría



Fuente: Los autores

6.3.2 LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO

Después de obtener los resultados anteriores se realizan ensayos de limite liquido INV 125-13 se remueve cualquier material retenido en el tamiz N°40, este límite se determina mediante tanteos; la muestra es colocada sobre la cazuela de Casagrande dividida por un ranurador permitiendo que esta pueda tener un movimiento como resultado de los golpes recibidos.

El límite plástico según la norma INV E 126-13 se determina presionando una pequeña porción de suelo húmedo con la mano tratando de formar rollos de alrededor 3.3 mm hasta lograr que el contenido de agua se reduzca y así aparecer agrietamiento, luego de esto la muestra es llevada al horno.

Fotografía 5 Maquina de Casagrande



Fuente: Los autores

6.3.3 LIMITE DE CONTRACCION

Este procedimiento está basado en la norma INVE 127-13 se toma una cantidad de suelo saturada completamente hasta que se tenga una consistencia similar a la del límite líquido. Esta muestra se introduce en moldes metálicos sin dejar vacíos y se seca en el horno, anotando su masa, luego en un recipiente de vidrio usando el mercurio se determina el volumen desplazado que sería el volumen de la pastilla. Con los valores de humedad, volúmenes de suelo se obtiene el límite de contracción, el cual es calculado con la siguiente fórmula:

$$LC = W - \left(\frac{(V - V_0) * \rho_w}{M_0} \right) * 100$$

W = Contenido de humedad

V = Volumen de la masa del suelo húmedo

V_0 = volumen de la masa del suelo seco

M_0 = Peso del suelo seco

ρ_w = Densidad del agua aproximadamente igual a 1.0 g/cm³

Fotografía 6 Limite de contracción



Fuente. Los autores

6.3.4 PROCTOR MODIFICADO

Luego de terminar con los ensayos anteriores, se realizan ensayos de Proctor estándar el cual es necesario para establecer la humedad óptima de compactación del suelo. Después del suelo ya secado al horno se pasa por el tamiz N°4 un peso alrededor de 4200 gramos para cada muestra y cada porcentaje de agua. (5%, 10%, 15%, 20%) Este ensayo sigue el

procedimiento de la INV 141-13. Método A: 5 capas, 56 golpes cada uno. Una vez ya compactado el suelo se pesa y se obtiene la densidad del suelo.

Fotografía 7 Proctor



Fuente. Los autores

Fotografía 8 Proctor estándar



Fuente. Los autores

Fotografía 9 Proctor estándar



Fuente. Los autores

6.3.5 CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR

Se realizó el ensayo California Bearing Ratio CBR para la determinación de un índice de resistencia del suelo calculando al final su densidad seca, peso unitario seco, expansión de la muestra. Ya obteniendo la humedad óptima del suelo se realizaron tres briquetas compactadas a 10,25,56 golpes respectivamente, aplicándole una precarga a cada una, se esperó su deformación inicial mientras que está saturada durante 72 horas, luego de esto se llevaron los moldes a la prensa en donde se toman datos de deformación.

Fotografía 10 Preparación muestra CBR



Fuente. Los autores

Fotografía 11 CBR



Fuente. Los autores

Fotografía 12 CBR



Fuente. Los autores

Fotografía 13 Ensayo CBR



Fuente. Los autores

6.3.6 CORTE DIRECTO

Después de tener el suelo compactado e inalterado se realiza un proceso de estabilización del suelo durante las horas INV E 154-13 como lo indica la norma en donde la muestra es forrada con papel film para evitar su contaminación, la finalidad de esto es dejar el material con un aproximado de 100% de su humedad natural con el objetivo de determinar la resistencia al corte. Después de los cinco días se interviene.

Tabla 2 Corte directo

CLASIFICACIÓN POR EL SISTEMA UNIFICADO (NORMA INV E-181)	PERIODO MINIMO DE ESTABILIZACION (HORAS)
SW-SM, SP-SM, SM	3
SC, ML, CL, SP-SC	18
MH, CH	36

Fuente. INVIAS 2013

Fotografía 14 Corte Directo preparación espécimen



Fuente. Los autores

El ensayo de corte directo se realizó con aumentos de carga, comenzando con una carga inicial de 0.5 kpa y una carga final de 2 kpa.

7 RESULTADOS SUELO NATURAL

7.1 GRANULOMETRIA

Para el ensayo de granulometría se realizaron tres ensayos para poder obtener un promedio y así una mayor precisión.

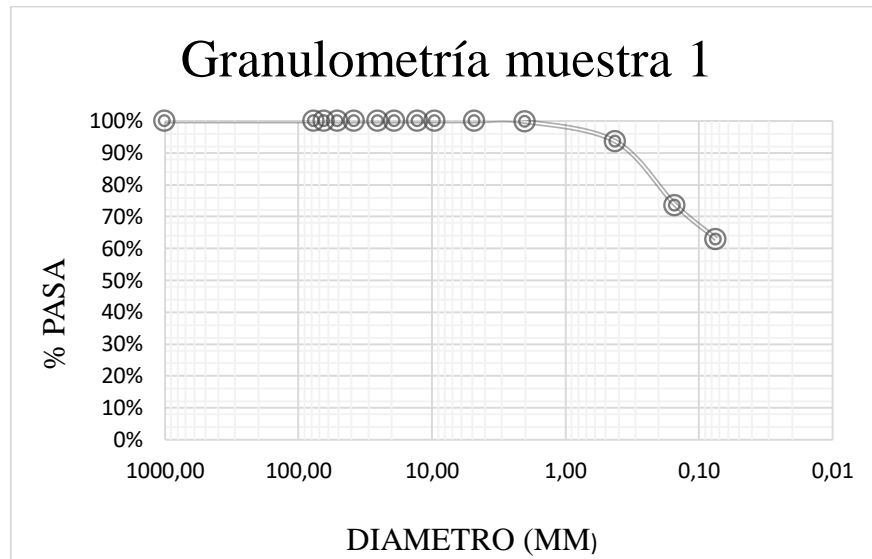
➤ MUESTRA 1

Tabla 3 Granulometría muestra 1

Gravas	0.0%
Arenas	37.1%
Finos	62.9%

Fuente. Los autores

Figura 2 Granulometría muestra 1



Fuente. Los autores

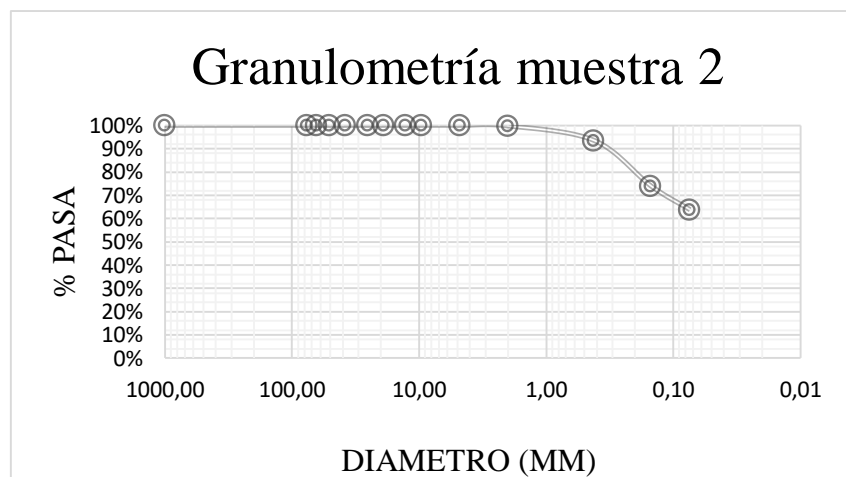
➤ MUESTRA 2

Tabla 4 Granulometría muestra 2

Gravas	0.0%
Arenas	36.4%
Finos	63.6%

Fuente. Los autores

Figura 3 Granulometría muestra 2



Fuente. Los autores

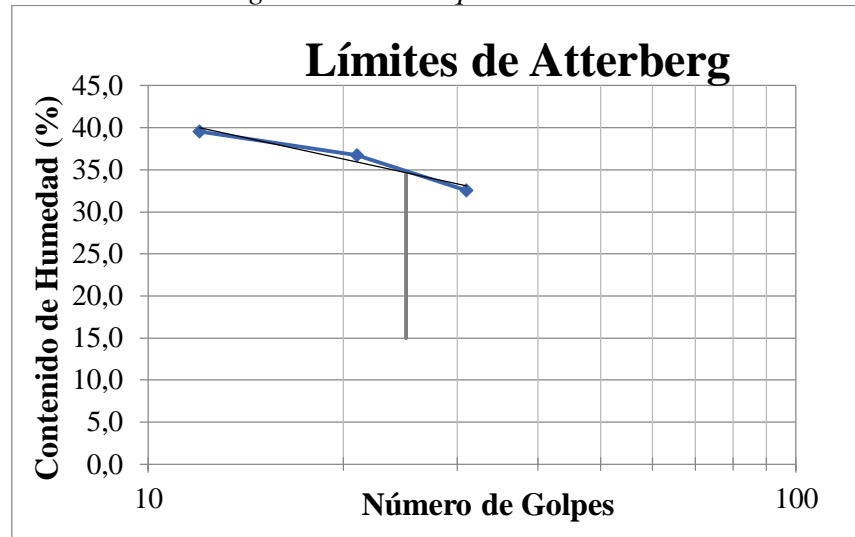
7.2 LIMITES DE ATTERBERG

A continuación, se describen los ensayos de límites de atterberg realizados al suelo natural

7.1.1 LIMITE LIQUIDO

➤ MUESTRA 1

Figura 5 Limite liquido muestra 1

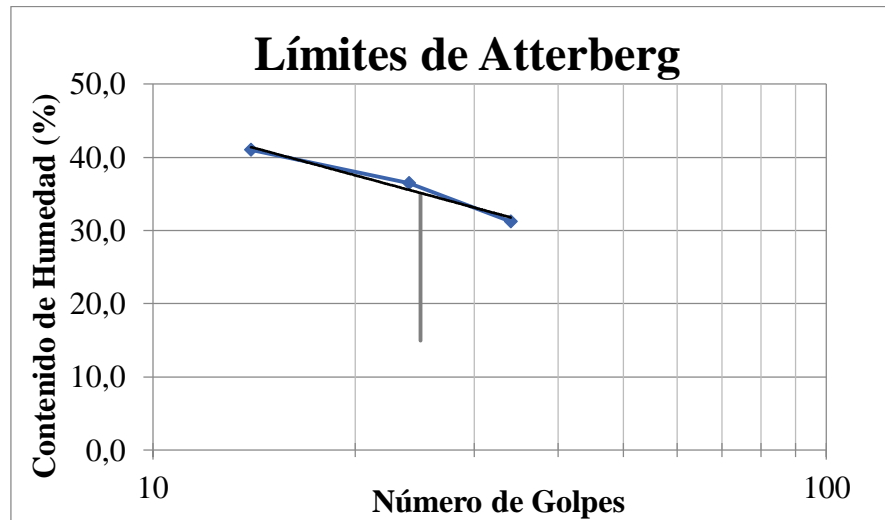


Fuente. Los autores

La primera muestra da un porcentaje de limite liquido de 34.5%

➤ MUESTRA 2

Figura 6 Limite liquido muestra 2

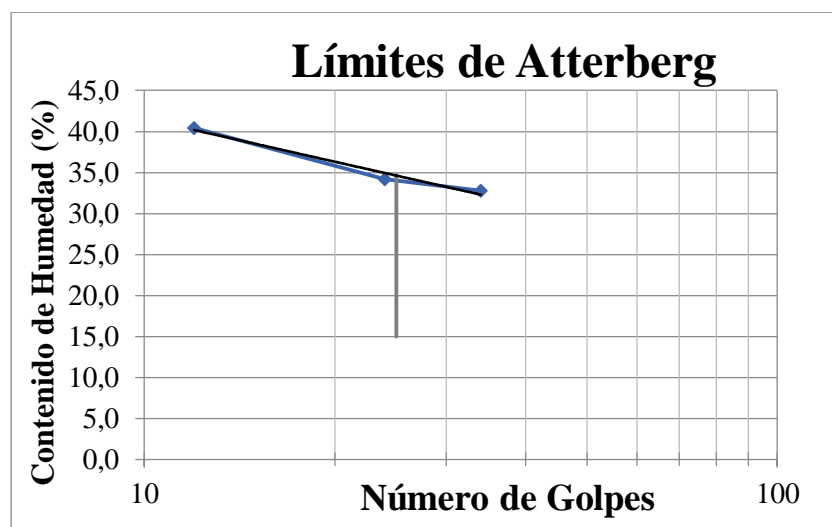


Fuente. Los autores

La segunda muestra da un porcentaje de limite liquido de 35%

➤ MUESTRA 3

Figura 7 Limite liquido muestra 3



Fuente. Los autores

La tercera muestra da un porcentaje de limite liquido de 34.8%

Los resultados del ensayo de limite liquido realizado en las tres muestras fueron promediados dando como resultado final un Limite Liquido del **34.8%**

7.1.2 LIMITE PLASTICO

➤ MUESTRA 1

Tabla 6 Limite plástico muestra 1

% HUMEDAD	
1	13.42
2	11.73

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 12.6%

➤ MUESTRA 2

Tabla 7 Limite plástico muestra 2

% HUMEDAD	
1	14.07
2	13.38

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 13.7%

➤ MUESTRA 3

Tabla 8 Limite plástico muestra 3

% HUMEDAD	
1	12.52
2	13.25

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 12.9%

Se realiza el promedio dando como resultado un porcentaje de Limite Plástico de 13.1%

Tabla 9 Clasificación suelo

Limite liquido
34.8
Limite Plástico
13.1
Índice de Plasticidad
21.7

Fuente. Los autores

Se presenta el cuadro de la clasificación del suelo de las tres muestras realizadas, dando como resultado un predominio de gran cantidad de finos, al clasificar el suelo por medio del método de clasificación (S.U.C.S), es un suelo CL (arcilla de baja plasticidad)

Tabla 10 resumen tipo de suelo natural

GRANULOMETRÍAS (SUELO NATURAL)			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
GRAVAS	0.0%	0.0%	0.0%
ARENAS	37.1%	36.4%	36.1%
FINOS	62.9%	63.6%	63.9%
TIPO DE SUELO	CL	CL	CL

Fuente. Los autores

7.3 LIMITE DE CONTRACCION

Tabla 11 Limite de contracción

LÍMITES DE CONTRACCIÓN					
SUELO NATURAL					
HUMEDAD (%)	PESO SUELO SECO (gr)	VOLUMEN (cm3)	VOLUMEN (cm3)	PESO DEL AGUA (gr/cm3)	LC
40,08	18,27	14,33	10,11	1,00	17,00

Fuente. Los autores

Finalizado el ensayo, se obtuvieron los resultados ya presentados en la anterior tabla y como resultado nos da un valor de limite contracción: 17.

7.4 PROCTOR MODIFICADO

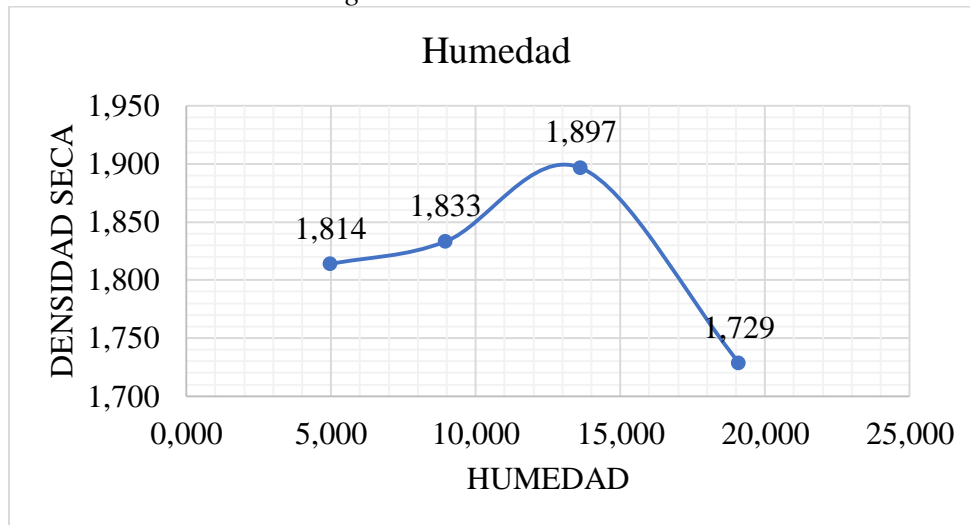
➤ MUESTRA 1

Tabla 12 Proctor Muestra 1

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm3)	1.897
HUMEDAD OPTIMA %	13.2

Fuente. Los autores

Figura 8 Proctor Muestra 1



Fuente. Los autores

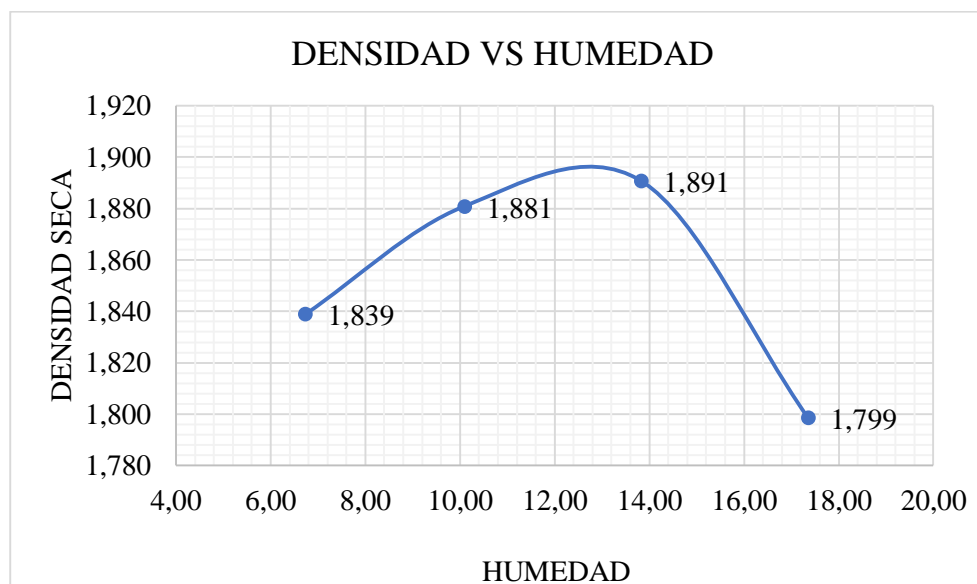
➤ MUESTRA 2

Tabla 13 Proctor Muestra 2

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm³)	1.891
HUMEDAD OPTIMA %	12.8

Fuente. Los autores

Figura 9 Proctor Muestra 2



Fuente. Los autores

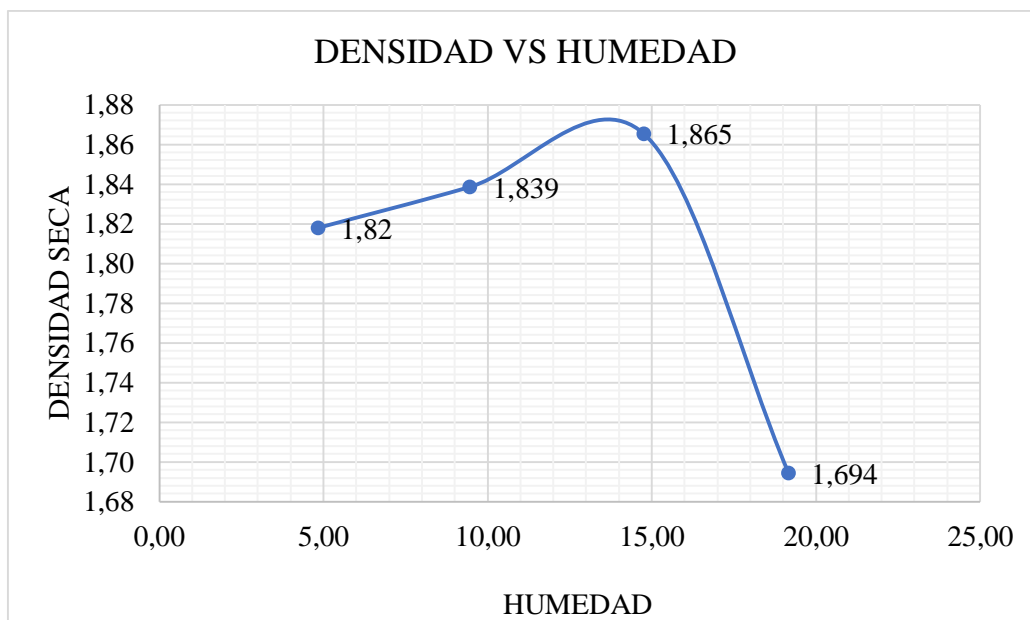
➤ MUESTRA 3

Tabla 14 Proctor Muestra 3

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm³)	1.861
HUMEDAD OPTIMA %	13.8

Fuente. Los autores

Figura 10 Proctor Muestra 3



Fuente. Los autores

El resultado de humedad (%) obtenido mediante el proceso del ensayo de Proctor modificado en las tres muestras es del 13.2 %.

Tabla 15 Resumen Proctor suelo natural

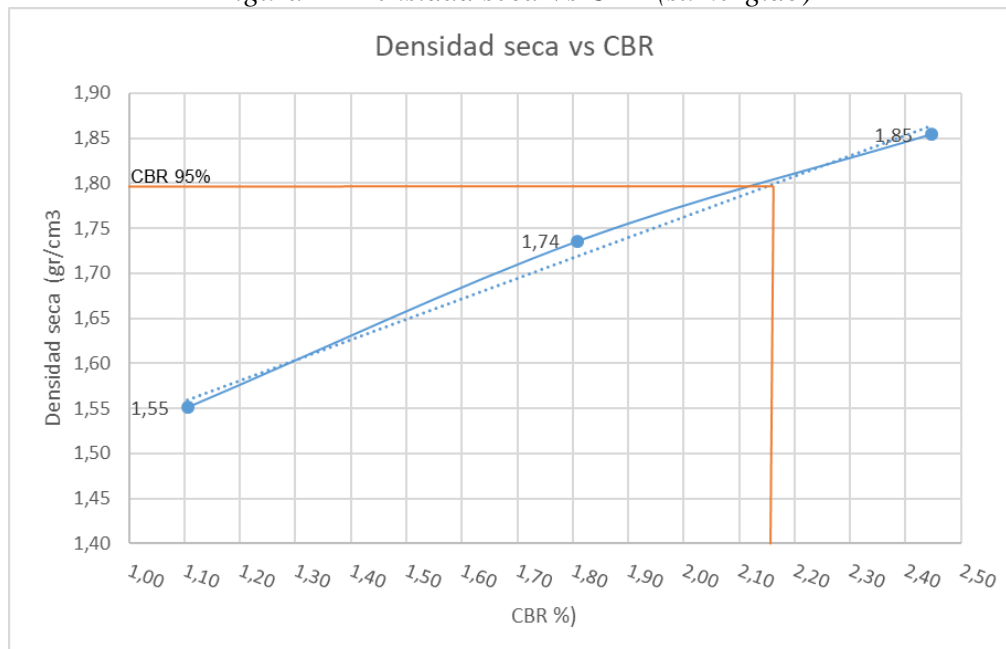
PROCTOR MODIFICADO				
SUELO NATURAL				
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
DENSIDAD MAX SECA (gr/cm ³)	1,897	1,891	1,8615	1,88
HUMEDAD OPTIMA %	13,2	12,8	13,8	13,27

Fuente. Los autores

7.5 CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR

7.5.1 CBR (Sumergido)

Figura 11 Densidad seca Vs CBR (sumergido)



Fuente. Los autores

Tabla 16 Datos finales CBR

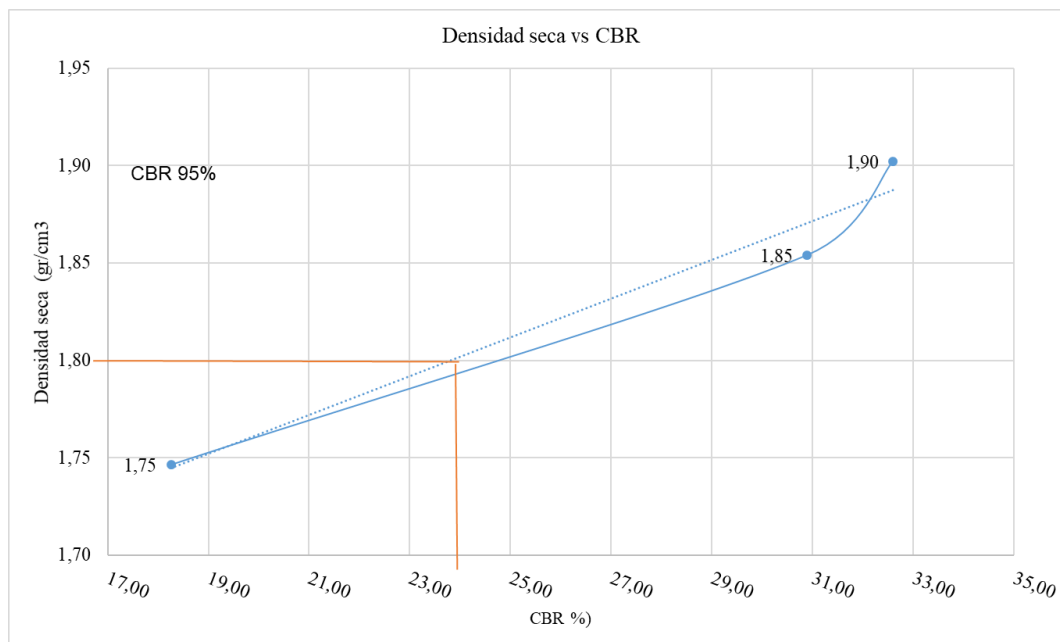
Densidad máxima	1,89
Humedad óptima	13%
95% Densidad Max	1,79
CBR 95%	2,18

Fuente. Los autores

7.5.2 CBR (Sin Sumergir)

➤ MUESTRA 1

Figura 12 Densidad seca vs CBR (sin sumergir) muestra 1



Fuente. Los autores

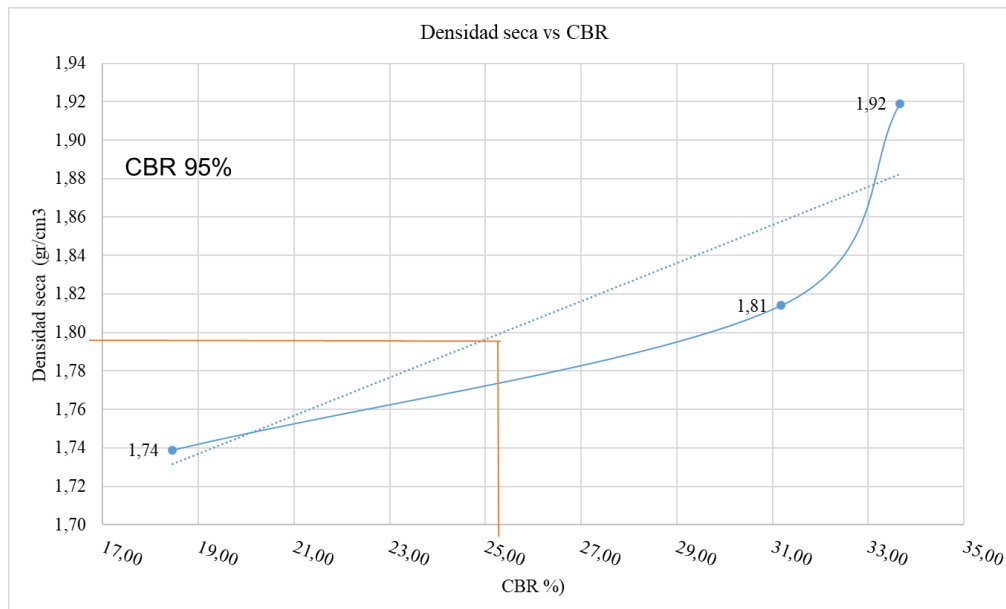
Tabla 17 Densidad seca vs CBR

Densidad máxima	1.83
Humedad optima	13.2%
95% Densidad Max	1,805
CBR 95%	24

Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

Figura 13 Densidad seca vs CBR (sin sumergir) muestra 2



Fuente. Los autores

Tabla 18 Datos finales CBR sin sumergir

Densidad máxima	1.82
Humedad optima	13.2%
95% Densidad Max	1,805
CBR 95%	26

Fuente. Los autores

A continuación, se muestra la tabla resumen de los ensayos de CBR realizados al suelo natural, estos ensayos se realizaron de forma sumergida y no sumergida, se promediaron los datos de los CBR's sin sumergir, ya que al realizar la estabilización con BioCEC, estos se realizarán de la misma forma.

Tabla 19 resumen CBR's suelo natural

CBR			
SUELO NATURAL			
	MUESTRA 1 (sumergida)	MUESTRA 2 (sin sumergir)	MUESTRA 3 (sin sumergir)
HUMEDAD OPTIMA (%)	13,1	13,2	13,2
DENSIDAD SECA MAX (95 %)	1,79	1,805	1,805
CBR (95 %)	2,18	25	26
CBR PROMEDIO (SIN SUMERGIR)			26

Fuente. Los autores

7.6 CORTE DIRECTO SUELO NATURAL

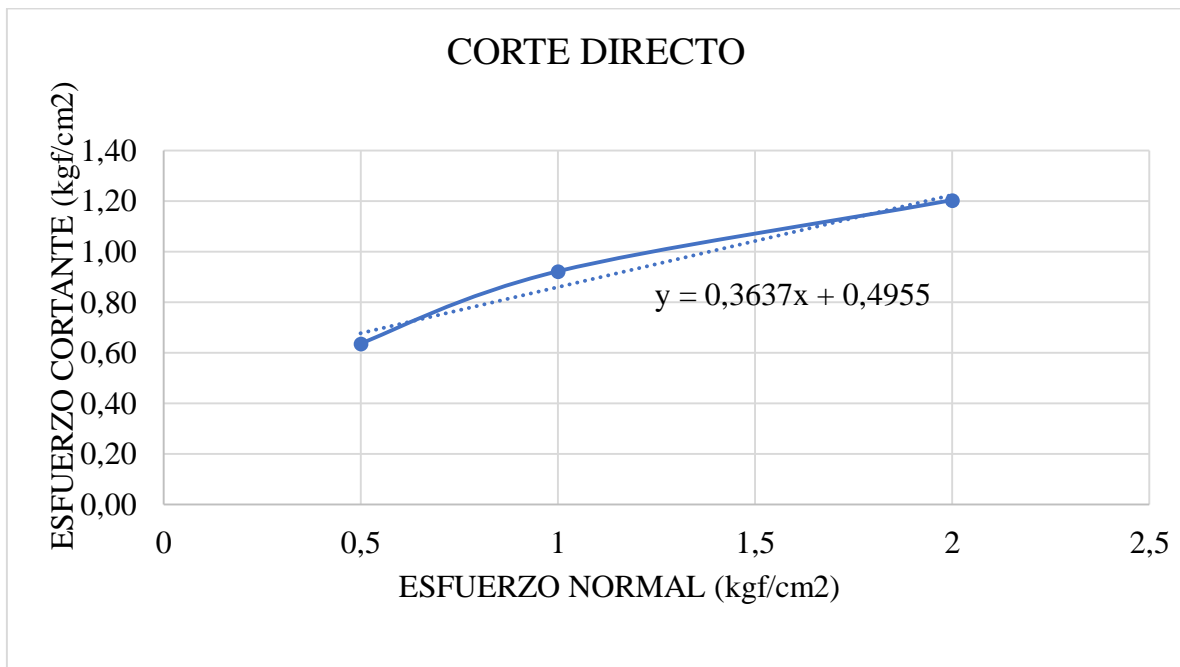
➤ MUESTRA 1

Tabla 20 Corte directo muestra 1

CORTE DIRECTO 5.5 % BioCEC		
Carga (Kgf)	Esfuerzo T (Kgf/cm²)	Esfuerzo σ (Kgf/cm²)
19,847	0,64	0,5
28,741	0,92	1
37,514	1,20	2

Fuente. Los autores

Figura 14 Corte directo muestra 1



Fuente. Los autores

Tabla 21 Resultados corte directo Muestra 1

Cohesión (kg/cm²)	0,4955
Angulo de fricción (°)	19,98

Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

Tabla 22 Corte directo muestra 2

CORTE DIRECTO SUELO NATURAL		
Carga Kgf	Esfuerzo T Kgf/cm²	Esfuerzo σ Kgf/cm²
18.574	0.60	0.5
29.623	0.95	1
36.941	1.18	2

Fuente. Los autores

Figura 15 Corte directo muestra 2

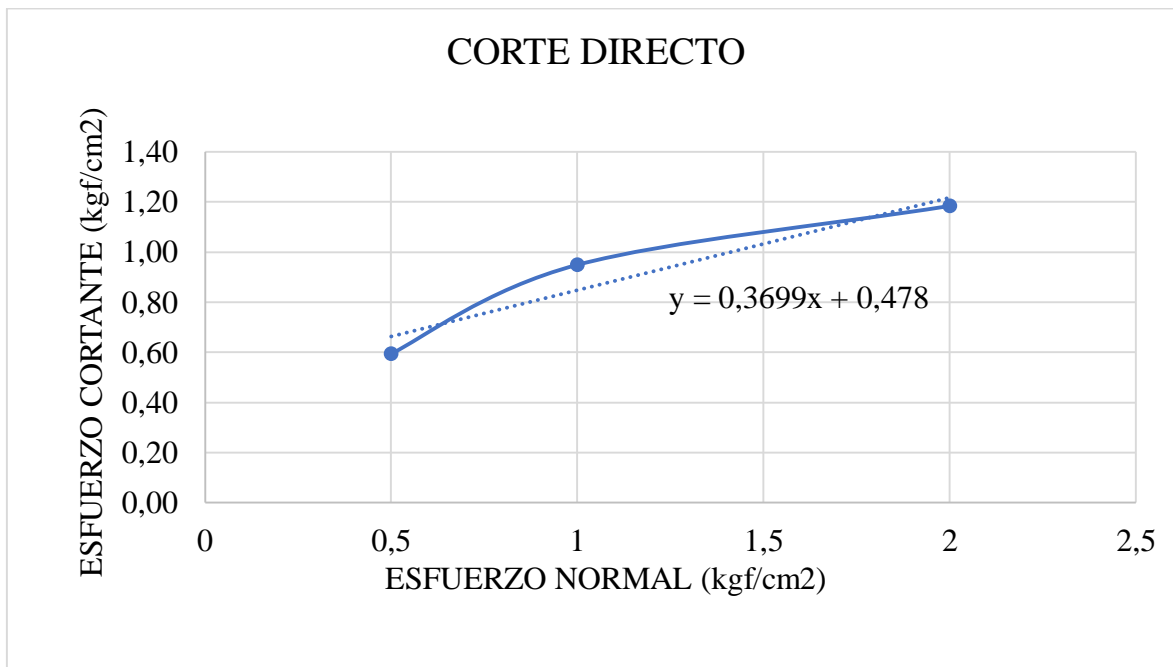


Tabla 23 Resultados corte directo Muestra 2

Cohesión (kg/cm²)	0.478
Angulo de fricción (°)	20.299

Fuente. Los autores

A continuación, presentamos los resultados promediados del ensayo de corte directo realizado el suelo natural (CL)

Tabla 24 resumen Corte directo

CORTE DIRECTO SUELO NATURAL			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
Cohesión (kg/cm²)	0.4955	0.478	0.487
Angulo de fricción (°)	19.98	20.299	20.140

Fuente. Los autores

7.7 COMPRESION SIMPLE

➤ MUESTRA 1

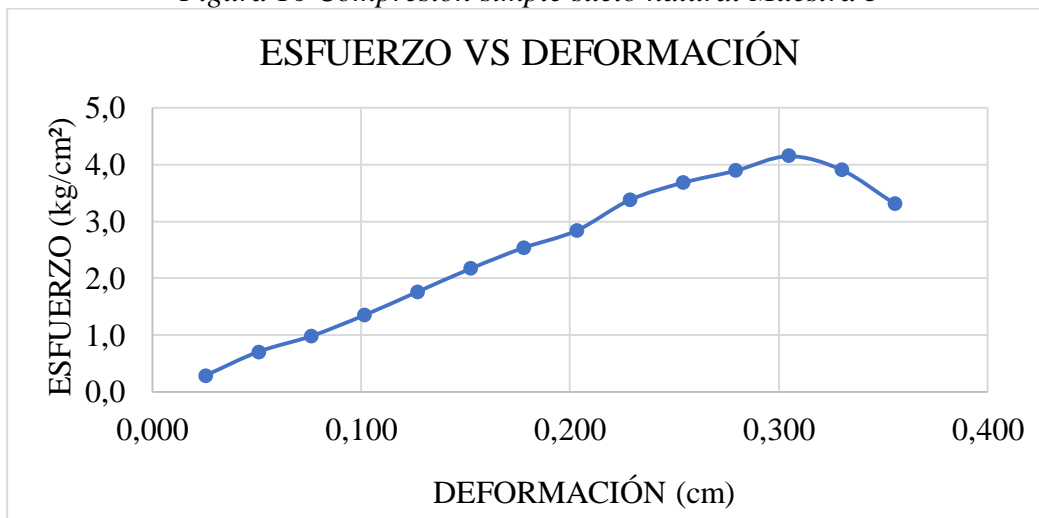
Tabla 25 Compresión simple suelo natural Muestra 1

COMPRESION SIMPLE SUELO NATURAL		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
2,72	0,025	0,282
6,80	0,051	0,702
9,53	0,076	0,980
13,15	0,102	1,348
17,24	0,127	1,760
21,32	0,152	2,169
24,49	0,178	2,537
28,12	0,203	2,840
33,57	0,229	3,378
36,74	0,254	3,684
39,01	0,279	3,897
41,73	0,305	4,154
39,46	0,330	3,913
33,57	0,356	3,316

qu (kg/cm²)	4,154	Cu (kg/cm²)	2,077
-------------------------------	-------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 16 Compresión simple suelo natural Muestra 3



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

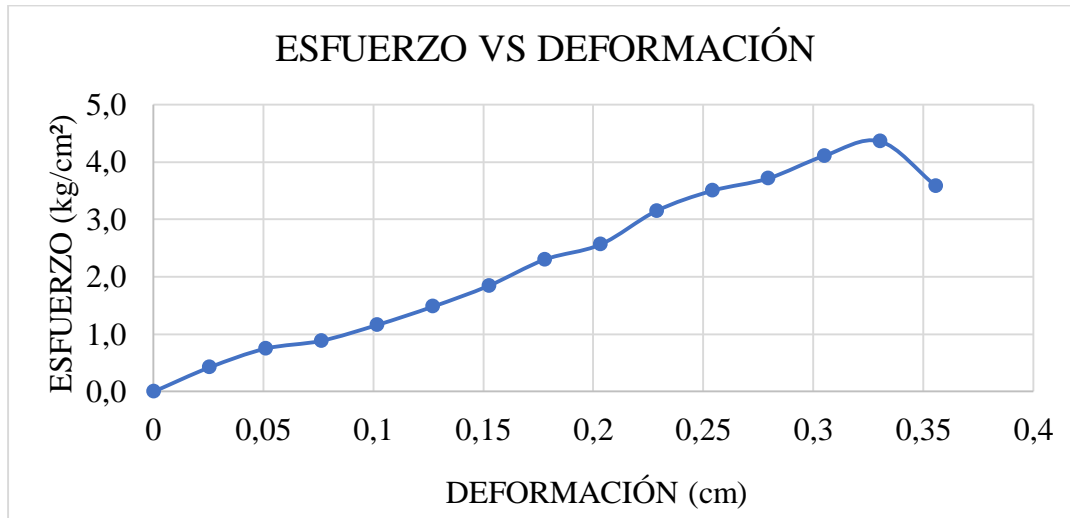
Tabla 26 Compresión simple suelo natural Muestra 2

COMPRESION SIMPLE SUELO NATURAL		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0
4,08	0,025	0,423
7,26	0,051	0,749
8,62	0,076	0,886
11,34	0,102	1,162
14,52	0,127	1,482
18,14	0,152	1,846
22,23	0,178	2,302
25,40	0,203	2,566
31,30	0,229	3,150
34,93	0,254	3,502
37,20	0,279	3,716
41,28	0,305	4,108
44,00	0,330	4,363
36,29	0,356	3,585

qu (kg/cm²)	4,363	Cu (kg/cm²)	2,182
-------------------------------	-------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 17 Compresión simple suelo natural Muestra 2



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 3

Tabla 27 Compresión simple suelo natural Muestra 3

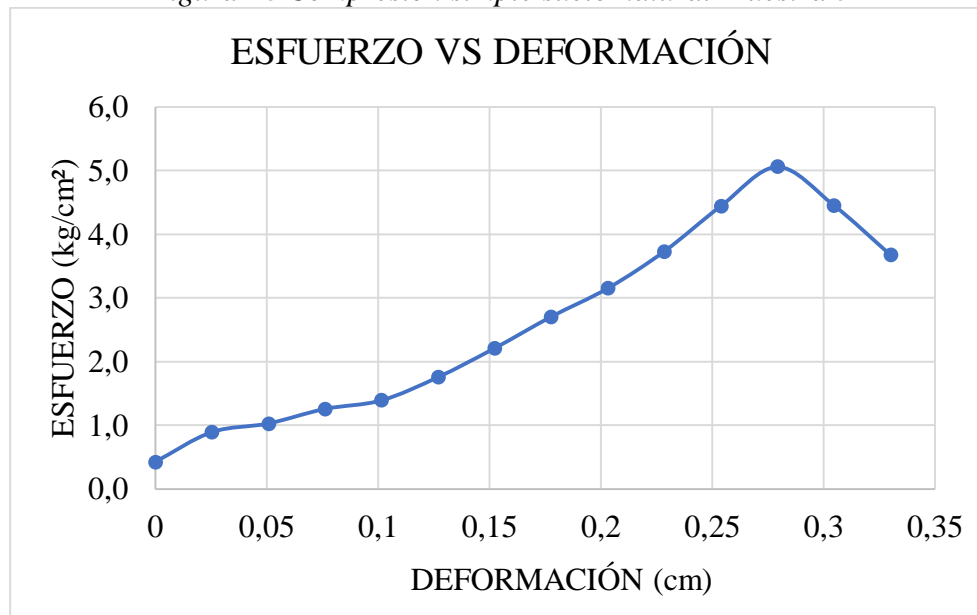
COMPRESION SUELO NATRUAL MUESTRA 3		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0
4,08	0,025	0,423
8,62	0,051	0,889
9,98	0,076	1,026
12,25	0,102	1,255
13,61	0,127	1,389
17,24	0,152	1,754
21,32	0,178	2,208
24,95	0,203	2,703
28,58	0,229	3,150
34,47	0,254	3,729
42,18	0,279	4,441

47,63	0,305	5,056
41,28	0,330	4,453
37,65	0,356	3,675

qu (kg/cm²)	5,056	Cu (kg/cm²)	2,528
-------------------------------	-------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 18 Compresión simple suelo natural Muestra 3



Fuente. Los autores

Después de realizar los tres ensayos de compresión simple, se promediaron los resultados, los cuales fueron:

Tabla 28 Promedio compresión simple suelo natural

COMPRESION SIMPLE SUELO NATURAL				
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
qu (kg/cm²)	4.154	4.363	5.056	4.524
Cu(kg7cm²)	2.077	2.182	2.528	2.262

Fuente. Los autores

8 RESULTADOS SUELO ESTABILIZADO CON BIOCEC

Fotografía 15 BioCEC presentación



Fuente. Los autores

Para conocer los porcentajes de dosificación de estabilizante iónico BioCEC es necesario realizar un ensayo de reactividad del suelo desarrollado por la empresa Plexus S.A ubicada en la ciudad de Medellín, para esto fue necesario enviar una muestra del suelo una cantidad aproximada de 5 kg para así poder determinar la compatibilidad del suelo con el estabilizante y por último evaluar el mejoramiento de este.

La cantidad del estabilizante iónico depende básicamente del tipo y cantidad de minerales presentes en el suelo a estabilizar. Una forma de concluir si el suelo utilizado en este proyecto puede ser mejorado con BioCEC es ver si denota o no plasticidad en este caso el suelo para trabajar en este proyecto es un material con predominio de finos e IP mayor a 0 así que se considera apto para realizar la estabilización química a este suelo.

El procedimiento rutinario más exacto para dosificar el estabilizador se basó en los resultados obtenidos de los ensayos de identificación y clasificación del suelo, siendo necesario conocer los datos de granulometría y los Límites de Atterberg, además de estos ensayos deben ser complementados por medio de un ensayo de reactividad con una muestra representativa de 5 kg aproximadamente. La función del ensayo de reactividad es conocer un poco más acerca de la naturaleza de la fracción fina y la capacidad de intercambio iónico, que es finalmente la compatibilidad con el estabilizador aplicando agua ionizada a la muestra y a partir de esta se van introduciendo pequeñas cantidades del reactivo hasta que el mismo equilibre las cargas y la solución quede completamente estable.

➤ **Metodología para el análisis de laboratorio en la estabilización iónica de suelos con el agente de BioCEC**

Paso 1

Análisis previos: se cuenta con los ensayos de clasificación (granulometría y límites de Atterberg), límites de contracción, Proctor modificado, corte directo, compresión simple y CBR, sobre el suelo sin adiciones del estabilizador.

Paso 2

Dosificación: De acuerdo con los resultados obtenidos en el paso 1 y los resultados del ensayo de reactividad realizados por el proveedor del aditivo BioCEC, este suministra la dosificación a emplear en las pruebas de laboratorio. Para la dosificación se deben realizar los siguientes pasos: - Dilución de 3 ml de BioCEC en 1 litro de agua desionizada (solución B+A, donde B es el estabilizante Biocec y A es agua desionizada) - El proveedor debe determinar la cantidad

(X ml) de la solución B+A, por medio de un ensayo de reactividad y este se aplicará por cada 1 Kg de suelo seco.

8.1 DOSIFICACION BIOCEC

Sabemos que si IP es mayor a 0 es casi seguro existirá algo de mineral arcilloso presente, pero este valor de por sí solo no nos brinda toda la información necesaria. Existen además de lo mencionado, determinados materiales que, a pesar de no contar una gran cantidad de minerales arcillosos, presentan una reactividad muy buena con BioCEC y por ende una buena posibilidad de mejorarlos también. Por esta misma razón, es que para que exista la posibilidad de mejoramiento de un suelo específico no es estrictamente necesario que sea un suelo con predominio de estos minerales en desequilibrio. Obviamente, si en un suelo existe un predominio de estos minerales el mejoramiento potencial y porcentual va a ser mayor que donde exista un predominio de materiales inertes (como grava, arena, etc.). En el caso de un suelo con predominio de materiales inertes, siempre y cuando exista una cantidad mínima de minerales en desequilibrio.

Con respecto a la dosificación de X ml de la solución B+A por cada Kg. de suelo seco tipo (CL) utilizado en los ensayos, serían las siguientes:

- 55 ml de la solución B+A por cada kg. de suelo seco. (5.5%)
- 60 ml de la solución B+A por cada kg. de suelo seco (6.0 %)
- 66 ml de la solución B+A por cada kg. de suelo seco. (6.6 %)

8.2 PREPARACION SUELO MEJORADO CON BIOCEC

1. Adicionar agua sola en un recipiente plástico, hasta llegar a la proporción de 1,5 litros de agua por cada 1 Kg de suelo seco a tratar.
2. Adicionar al recipiente con agua la dosificación recomendada por el proveedor X ml de la solución B+A por cada 1 Kg de suelo seco a tratar.

Fotografía 16 Adición del estabilizante BioCEC



Fuente. Los autores

3. Homogenizar durante 10 minutos.
4. Preparar el suelo a tratar para ser adicionado al recipiente. El suelo debe estar seco y completamente suelto, libre de terrones.
5. Adicionar al recipiente plástico la cantidad de suelo seco a tratar con el estabilizador.
6. Mezclar muy bien durante 10 minutos o más, hasta homogenizar por completo la mezcla suelo + agua + solución(B+A).

Fotografía 17 Adición del suelo



Fuente. Los autores

7. Dejar reposar y decantar por 24 horas a temperatura ambiente de laboratorio
8. Mezclar nuevamente muy bien durante 10 minutos o más, hasta homogenizar por completo la mezcla suelo + agua + solución (B+A).

Fotografía 18 Mezcla solución más suelo



Fuente. Los autores

9. Dejar reposar mínimo por otras 24 horas o hasta que se decante por completo todos los sólidos del recipiente.

Fotografía 19 Decantación del suelo más solución



Fuente. Los autores

10. Filtrar el agua sobrante del recipiente.

Fotografía 20 Filtración agua



Fuente. Los autores

11. Dejar secar por completo, a temperatura ambiente, el suelo tratado con BioCEC.

Paso 3

Ensayos de evaluación: Una vez terminado el proceso de secado del suelo con BioCEC, estará listo para someterse a los ensayos realizados al suelo natural (CL) según la norma correspondiente a cada uno de estos ensayos de la misma forma que en el paso 1 “Análisis Previos”.

1. Proctor modificado: se realiza el ensayo Proctor modificado.

2. CBR: se compactan los moldes de CBR y se realiza ensayo de penetración antes de inmersión, es decir, en condición seca. Los resultados de CBR después de inmersión no son válidos para las estabilizaciones iónicas, puesto que no es un producto cementante, ni

aglutinante, ni impermeabilizante; por lo tanto, en condición de inmersión el agua se filtra por capilaridad y se satura el sistema.

3. Límites de Atterberg: con el material que se realizaron los modelos de CBR se toma muestra para realizar nuevamente límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad)

8.3 SUELO ESTABILIZADO CON BioCEC 5.5%

Para la estabilización del suelo natural (CL) se estableció un porcentaje de 5.5% del estabilizante iónico BioCEC.

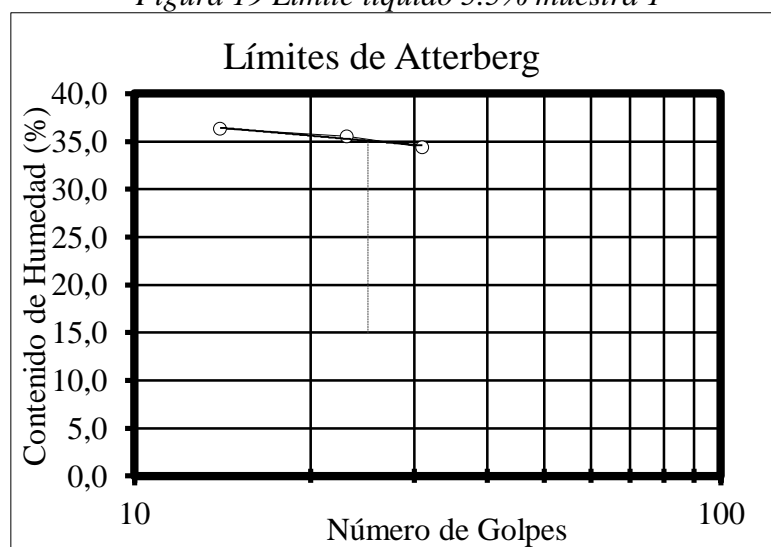
8.3.1 LIMITES DE ATTERBERG

A continuación, se describen los ensayos de límites de atterberg realizados el suelo con BioCEC del 5.5 %

8.3.1.1 LIMITE LIQUIDO

➤ MUESTRA 1

Figura 19 Limite liquido 5.5% muestra 1

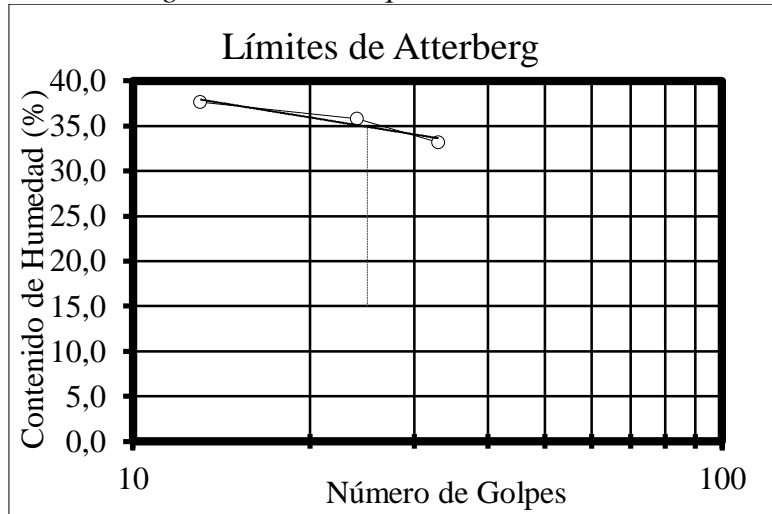


Fuente. Los autores

La primera muestra da un porcentaje de limite liquido de 35%

➤ MUESTRA 2

Figura 20 Limite liquido 5.5% muestra 2

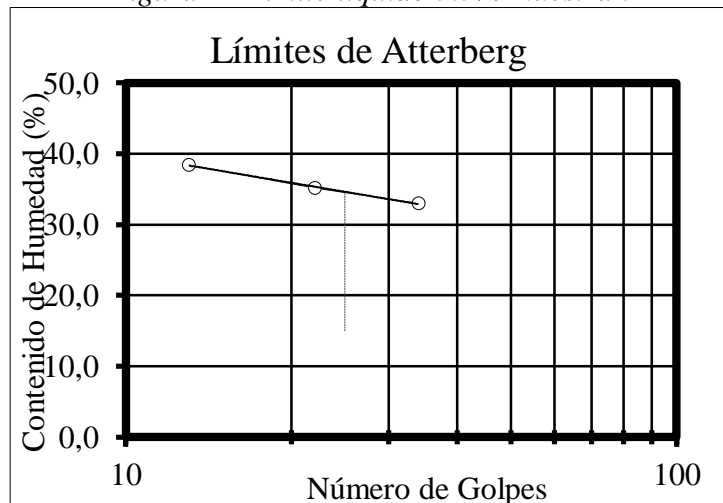


Fuente. Los autores

La segunda muestra da un porcentaje de limite liquido de 34.8%

➤ MUESTRA 3

Figura 21 Limite liquido 5.5% muestra 3



Fuente. Los autores

La tercera muestra da un porcentaje de limite liquido de 34.7%

Los resultados del ensayo de limite liquido realizado en las tres muestras de suelo estabilizado con 5.5% de BioCEC fueron promediados dando como resultado final un Limite Liquido del 34.83%

8.3.1.2 LIMITE PLASTICO

➤ MUESTRA 1

Tabla 29 Limite plástico 5.5% muestra 1

% HUMEDAD	
1	15.38
2	16.50

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 15.94%

➤ MUESTRA 2

Tabla 30 Limite plástico 5.5% muestra 2

% HUMEDAD	
1	15.16
2	16.05

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 15.60%

➤ MUESTRA 3

Tabla 31 Limite plástico 5.5% muestra 3

% HUMEDAD	
1	14.94
2	15.38

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 15.2%

Se realiza el promedio dando como resultado un porcentaje de Limite Plástico de 15.58%

Tabla 32 Resultado limites 5.5% BioCEC

Limite liquido
34.83
Limite Plástico
15.58
Índice de Plasticidad
19.25

Fuente. Los autores

Los valores obtenidos de los límites del suelo con 5.5% BioCEC dan un resultado óptimo para la estabilización del suelo disminuyendo su contenido de humedad.

8.3.2 LIMITE DE CONTRACCION

Tabla 33 Limite de contracción 5.5% BioCEC

LÍMITES DE CONTRACCIÓN					
BioCEC 5,5%					
HUMEDAD (%)	PESO SUELO SECO (gr)	VOLUMEN (cm3)	VOLUMEN (cm3)	PESO DEL AGUA (gr/cm3)	LC
36,03	22,91	14,15	9,98	1,00	17,82

Fuente. Los autores

Finalizado el ensayo, se obtuvieron los resultados ya presentados en la anterior tabla y como resultado nos da un valor de limite contracción: 17.82

8.3.3 PROCTOR MODIFICADO

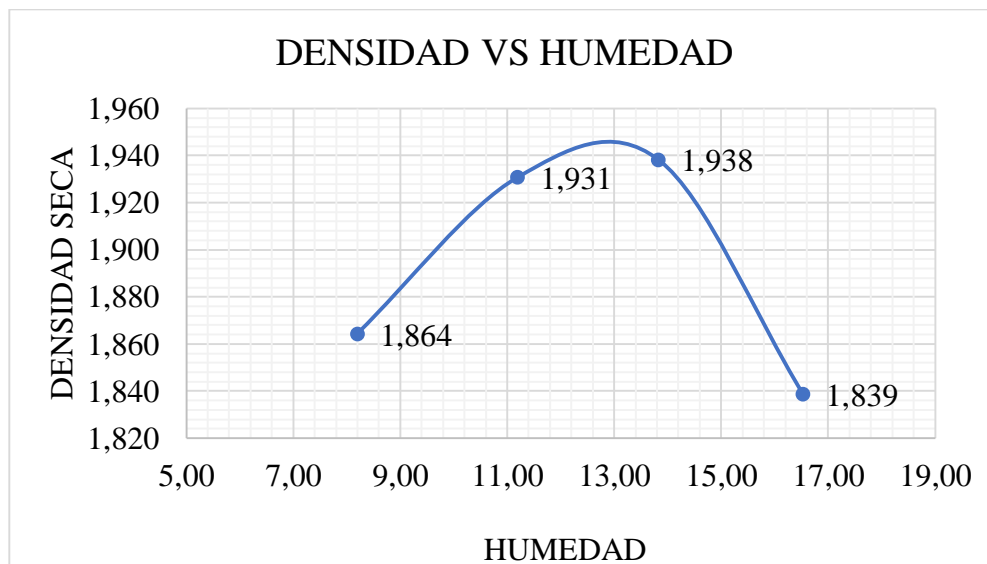
➤ MUESTRA 1

Tabla 34 Proctor 5.5% BioCEC muestra 1

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm³)	1.946
HUMEDAD OPTIMA %	13

Fuente. Los autores

Figura 22 Proctor 5.5% BioCEC muestra 1



Fuente. Los autores

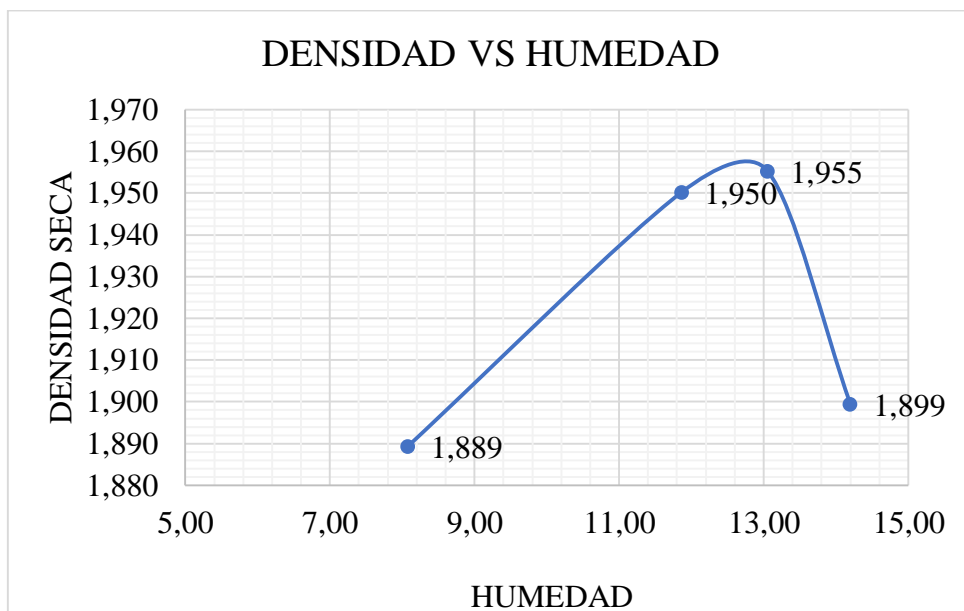
➤ MUESTRA 2

Tabla 35 Proctor 5.5% BioCEC muestra 2

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm³)	1.957
HUMEDAD OPTIMA %	13.1

Fuente. Los autores

Figura 23 Proctor 5.5% BioCEC muestra 2



Fuente. Los autores

El resultado de humedad (%) obtenido mediante el proceso del ensayo de Proctor modificado en las dos muestras con 5.5% BioCEC es del 13.05 %.

Tabla 36 Promedio Proctor suelo BioCEC 5.5 %

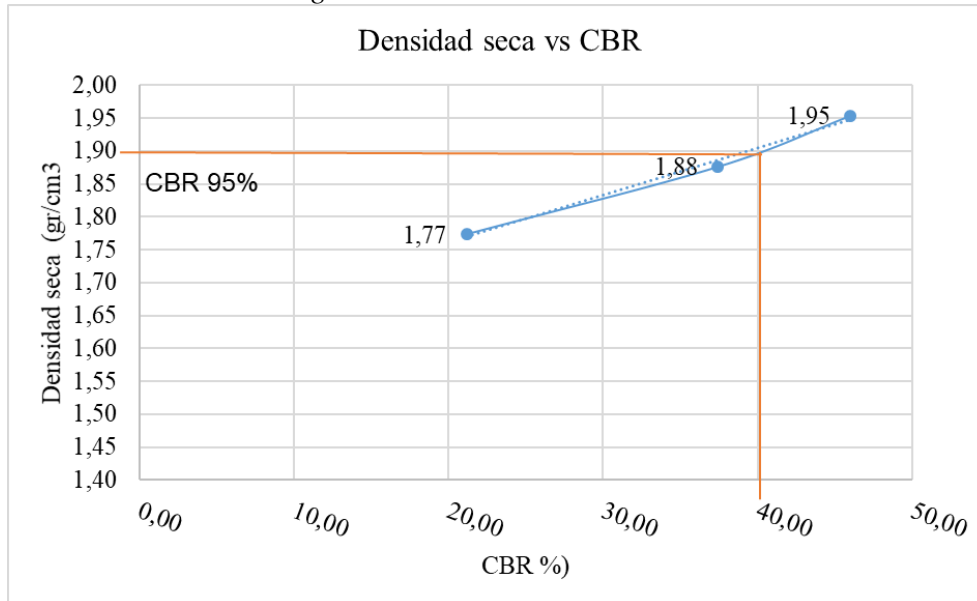
PROCTOR MODIFICADO			
SUELO BIOCEC 5,5 %			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
DENSIDAD MAX SECA (gr/cm ³)	1,946	1,957	1,9515
HUMEDAD OPTIMA %	13	13,1	13,05

Fuente. Los autores

8.3.4 CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR

➤ MUESTRA 1

Figura 24 Densidad seca Vs CBR



Fuente. Los autores

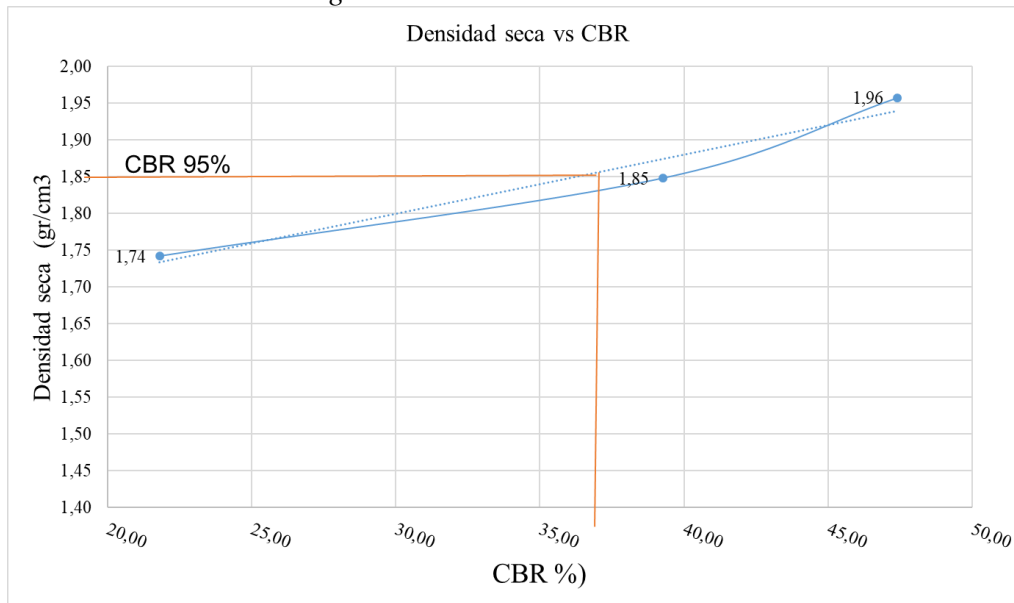
Tabla 37 Datos finales CBR

Densidad máxima	1.90
Humedad optima	13%
95% Densidad Max	1,854
CBR 95%	40

Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

Figura 25 Densidad seca Vs CBR



Fuente. Los autores

Tabla 38 Datos finales CBR

Densidad máxima	1.90
Humedad optima	13%
95% Densidad Max	1,854
CBR 95%	38

Fuente. Los autores

Los resultados del ensayo de CBR de la muestra del suelo más BioCEC 5.5% fueron promediados, a continuación, presentamos la tabla resumen.

Tabla 39 promedio CBR´s suelo BioCEC 5.5%

CBR		
BIOCEC 5.5 %		
	MUESTRA 1	MUESTRA 2
HUMEDAD OPTIMA (%)	13	13,1
DENSIDAD SECA MAX (95 %)	1,854	1,854
CBR (95 %)	40	38
CBR PROMEDIO		39

Fuente. Los autores

8.3.5 CORTE DIRECTO

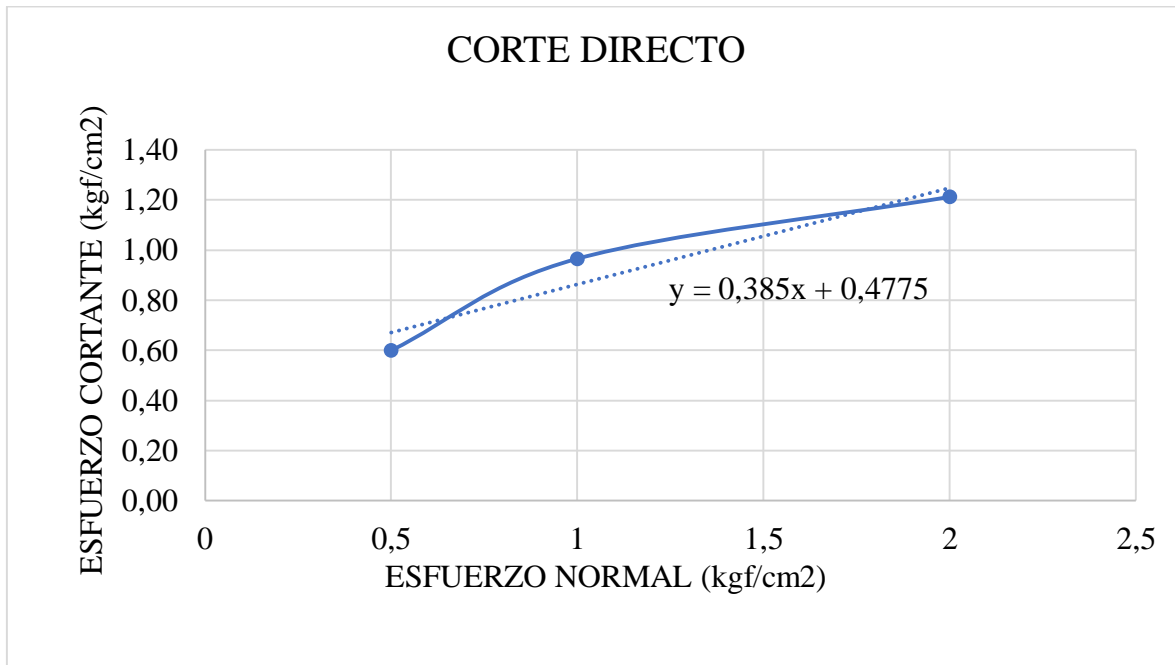
➤ MUESTRA 1

Tabla 40 Corte directo 5.5% BioCEC muestra 1

CORTE DIRECTO 5.5 % BioCEC		
Carga (Kgf)	Esfuerzo T (Kgf/cm2)	Esfuerzo σ (Kgf/cm2)
18,741	0,60	0,5
30,154	0,97	1
37,840	1,21	2

Fuente. Los autores

Tabla 41 Corte directo 5.5% muestra 1



Fuente. Los autores

Tabla 42 Resultados corte directo 5.5 % BioCEC muestra 1

Cohesión (kg/cm²)	0,4775
Angulo de fricción (°)	21.057

Fuente. Los autores

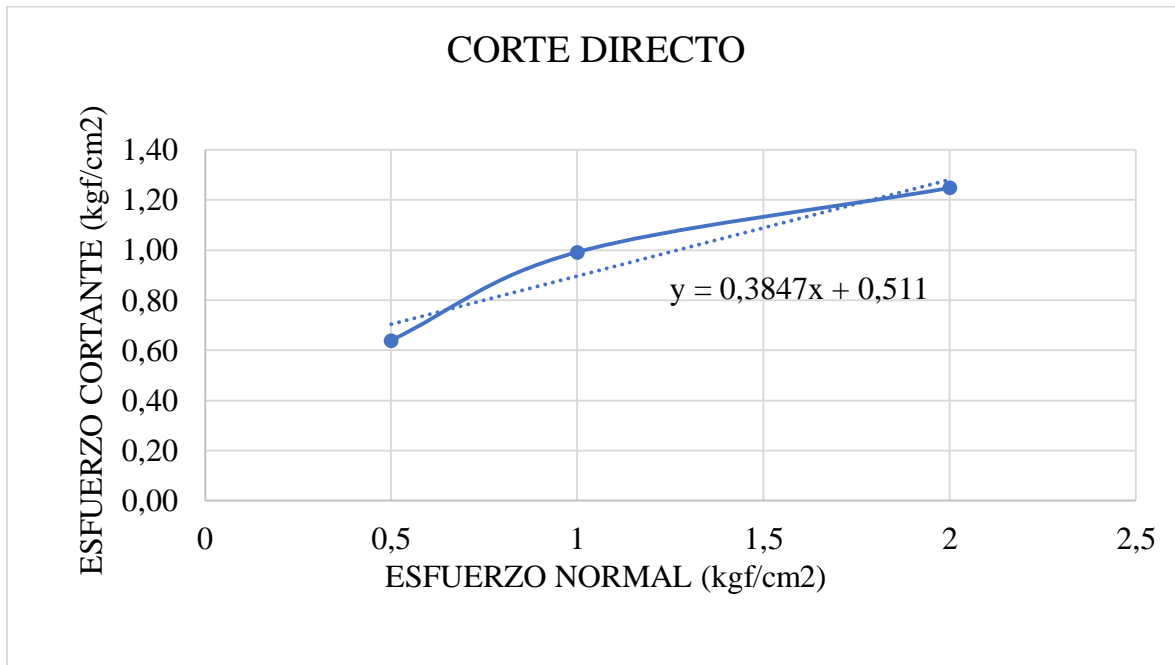
➤ MUESTRA 2

Tabla 43 Corte directo 5.5 % BioCEC muestra 2

CORTE DIRECTO 5.5 % BioCEC		
Carga (Kgf)	Esfuerzo T (Kgf/cm²)	Esfuerzo σ (Kgf/cm²)
19,945	0,64	0,5
30,947	0,99	1
38,951	1,25	2

Fuente. Los autores

Figura 26 Corte directo 5.5% BioCEC muestra 2



Fuente. Los autores

Tabla 44 Resultados corte directo muestra 2

Cohesión (kg/cm²)	0,4775
Angulo de fricción (°)	21.057

Fuente. Los autores

A continuación, se presenta el promedio de los ensayos de corte directo realizados al suelo natural (CL) con 5.5 % de BioCEC:

Tabla 45 Resumen corte directo 5.5 % BioCEC

CORTE DIRECTO BIOCEC 5.5 %			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
COHESION (kg/cm²)	0.511	0.4775	0.494
ANGULO DE FRICCIÓN (°)	21.042	21.057	21.050

Fuente. Los autores

8.3.6 COMPRESION SIMPLE

➤ MUESTRA 1

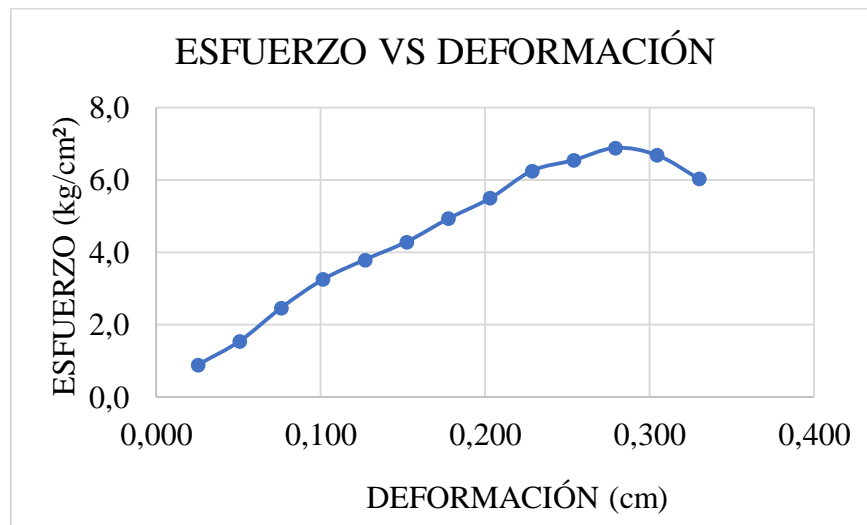
Tabla 46 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 1

COMPRESION SIMPLE 5.5 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
8,62	0,025	0,893
14,97	0,051	1,545
24,04	0,076	2,472
31,75	0,102	3,254
37,20	0,127	3,798
42,18	0,152	4,292
47,63	0,178	4,933
54,43	0,203	5,498
62,14	0,229	6,254
65,32	0,254	6,549
68,95	0,279	6,888
67,13	0,305	6,682
60,78	0,330	6,027

qu (kg/cm²)	6,888	Cu (kg/cm²)	3,444
-------------------------------	-------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 27 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 1



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

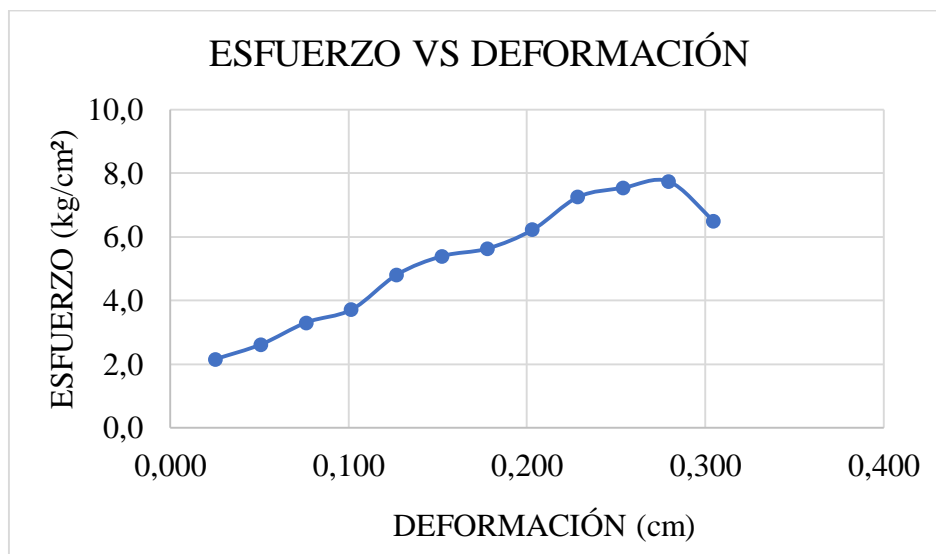
Tabla 47 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 2

COMPRESION SIMPLE 5.5 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
20,87	0,025	2,161
25,40	0,051	2,622
32,21	0,076	3,312
36,29	0,102	3,718
47,17	0,127	4,817
53,07	0,152	5,399
54,43	0,178	5,638
61,69	0,203	6,231
72,12	0,229	7,258
75,30	0,254	7,550
77,57	0,279	7,749
65,32	0,305	6,501

qu (kg/cm2)	7,749	Cu (kg/cm2)	3,874
--------------------	-------	--------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 28 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 2



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 3

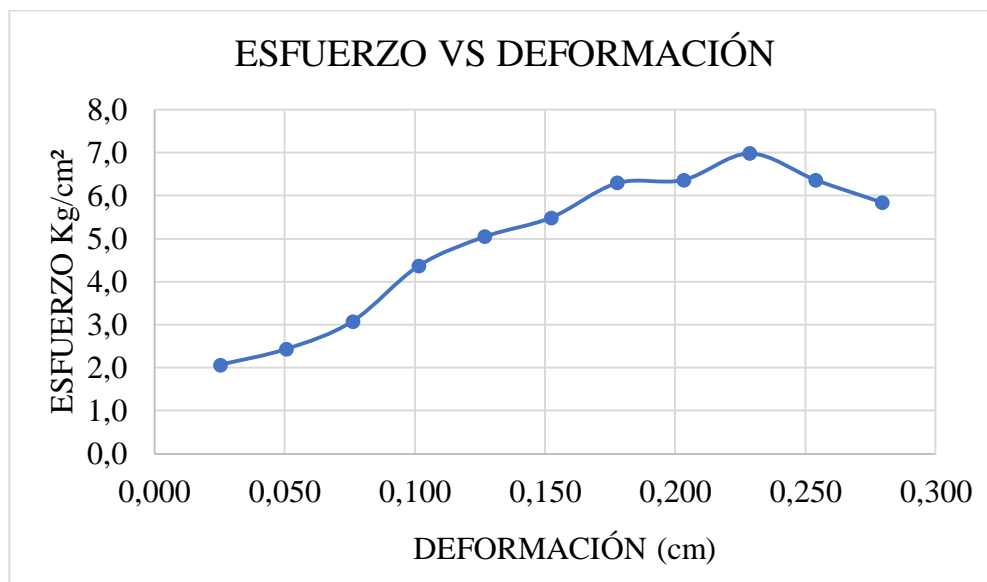
Tabla 48 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 3

COMPRESION SIMPLE 5.5 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
19,96	0,025	2,067
23,59	0,051	2,434
29,94	0,076	3,079
42,64	0,102	4,369
49,44	0,127	5,048
53,98	0,152	5,491
60,78	0,178	6,295
63,05	0,203	6,368
69,40	0,229	6,984
63,50	0,254	6,367
58,51	0,279	5,845

qu (kg/cm2)	6,984	Cu (kg/cm2)	3,492
-------------	-------	-------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 29 Compresión simple 5.5 % BioCEC muestra 3



Fuente. Los autores

A continuación, se presenta el promedio de los ensayos de compresión simple realizados al suelo (CL) con 5.5% de BioCEC, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 49 Promedio compresión simple 5.5% BioCEC

COMPRESIÓN SIMPLE SUELO 5.5 % BIOCEC				
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
qu (kg/cm2)	6.888	7.749	6.984	7.207
Cu(kg7cm2)	3.444	3.8745	3.492	3.604

Fuente. Los autores

8.4 SUELO ESTABILIZADO CON 6% BioCEC

Para la estabilización del suelo natural (CL) se estableció un porcentaje de 6.0% del estabilizante iónico BioCEC.

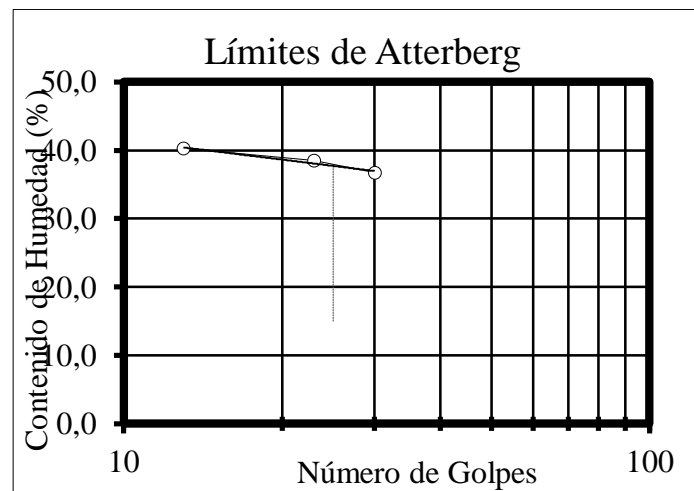
8.4.1 LÍMITES DE ATTEBERG

A continuación, se describen los ensayos de límites de Atterberg realizados el suelo con BioCEC del 6.0 %

8.4.1.1 LIMITE LIQUIDO

➤ MUESTRA 1

Figura 30 Limite liquido 6% muestra 1

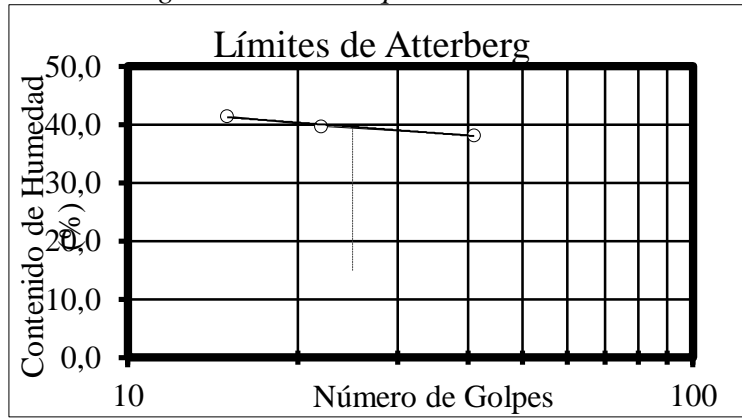


Fuente. Los autores

La primera muestra da un porcentaje de limite liquido de 37.6

➤ MUESTRA 2

Figura 31 Limite liquido 6% muestra 2

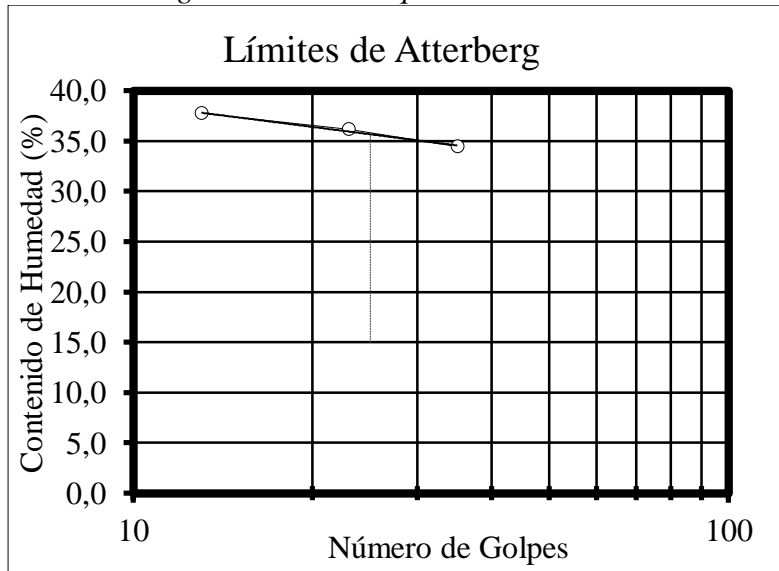


Fuente. Los autores

La segunda muestra da un porcentaje de limite liquido de 39.6%

➤ MUESTRA 3

Figura 32 Limite liquido 6% muestra 3



Fuente. Los autores

La tercera muestra da un porcentaje de limite liquido de 35.6%

Los resultados del ensayo de limite liquido realizado en las tres muestras de suelo estabilizado con 6% de BioCEC fueron promediados dando como resultado final un Limite Liquido del 37.6%

8.4.1.2 LIMITE PLASTICO

➤ MUESTRA 1

Tabla 50 Limite plástico 6% Muestra 1

% HUMEDAD	
1	18.86
2	19.61

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 19.23%

➤ MUESTRA 2

Tabla 51 Limite plástico 6% Muestra 2

% HUMEDAD	
1	22.70
2	20.12

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 21.4

➤ MUESTRA 3

Tabla 52 Limite plástico 6% Muestra 3

% HUMEDAD	
1	17.99
2	16.46

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 17.22%

Se realiza el promedio dando como resultado un porcentaje de Limite Plástico de 19.3%

Tabla 53 Resultado limites 6% BioCEC

Limite liquido
37.6
Limite Plástico
19.3
Índice de Plasticidad
18.3

Fuente. Los autores

Los valores obtenidos de los límites del suelo con 6% BioCEC dan un resultado óptimo para la estabilización del suelo disminuyendo su contenido de humedad.

8.4.2 LIMITE DE CONTRACCION

Tabla 54 Limite de contracción

LÍMITES DE CONTRACCIÓN					
BioCEC 6.0 %					
HUMEDAD (%)	PESO SUELO SECO (gr)	VOLUMEN (cm ³)	VOLUMEN (cm ³)	PESO DEL AGUA (gr/cm ³)	LC
39.70	20.80	13.92	9.78	1.00	19.77

Fuente. Los autores

Finalizado el ensayo, se obtuvieron los resultados ya presentados en la anterior tabla y como resultado nos da un valor de limite contracción: 19.77

8.4.3 PROCTOR MODIFICADO

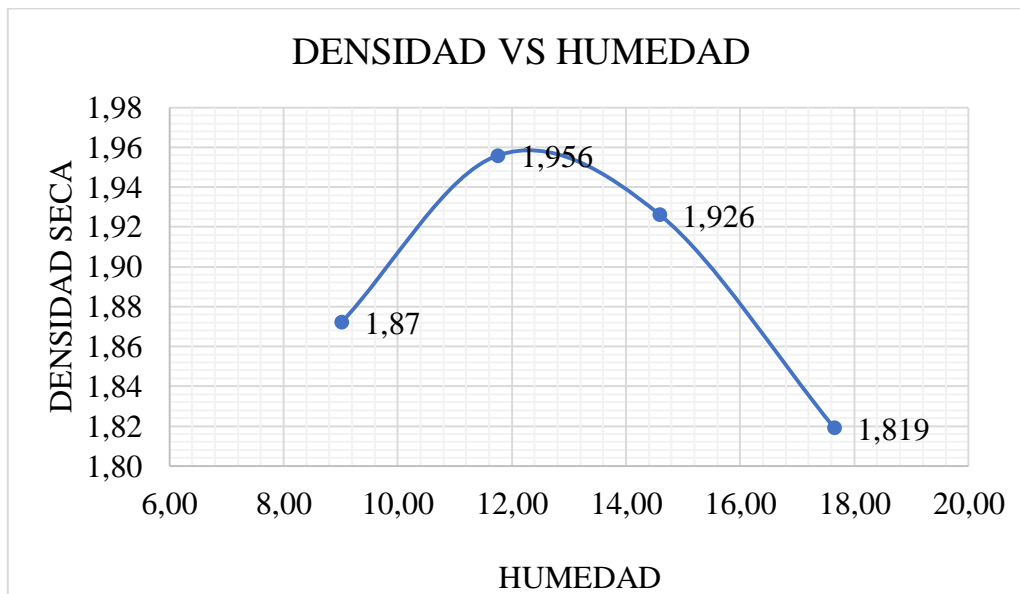
➤ MUESTRA 1

Tabla 55 Proctor 6% Muestra 1

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm³)	1.96
HUMEDAD OPTIMA %	12.3

Fuente. Los autores

Figura 33 Proctor 6% Muestra 1



Fuente. Los autores

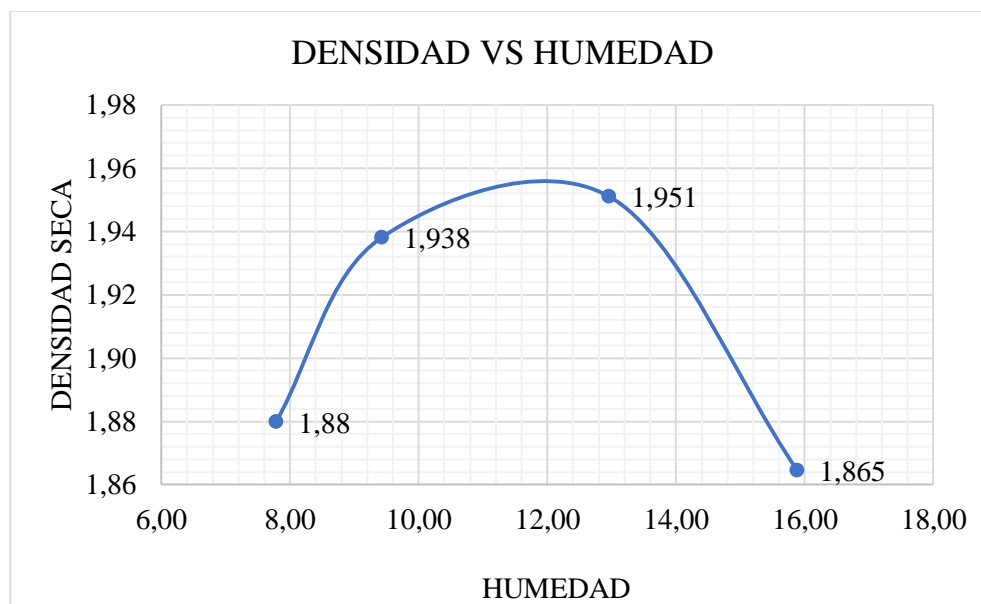
➤ MUESTRA 2

Tabla 56 Proctor 6% Muestra 2

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm³)	1.957
HUMEDAD OPTIMA %	12

Fuente. Los autores

Figura 34 Proctor 6% Muestra 2



Fuente. Los autores

El resultado de humedad (%) obtenido mediante el proceso del ensayo de Proctor modificado en las dos muestras con 6% BioCEC es del 12.15 %.

Tabla 57 promedio proctor suelo BioCEC 6.0 %

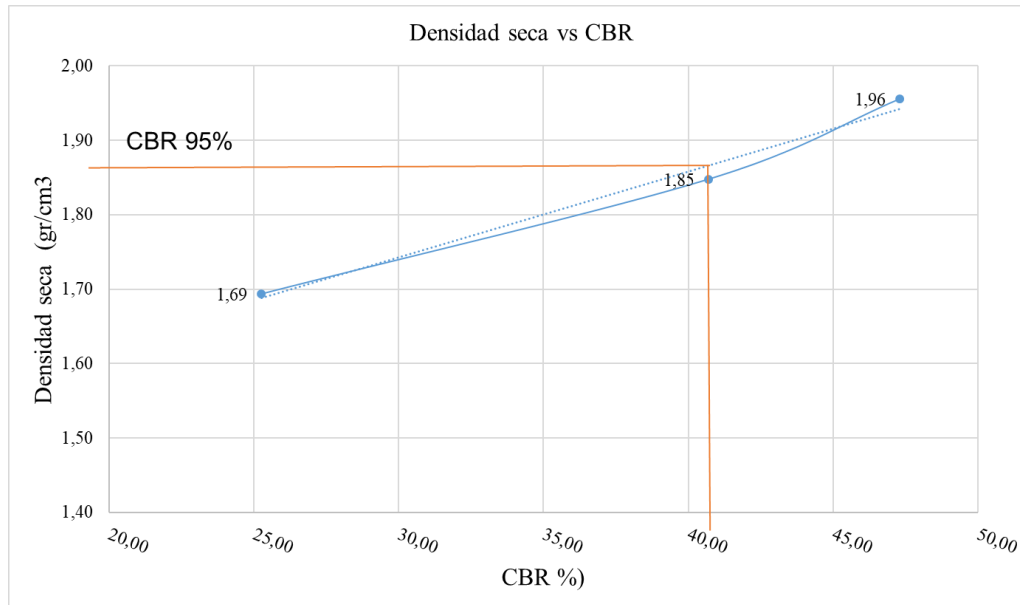
PROCTOR MODIFICADO			
SUELO BIOCEC 6,0 %			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
DENSIDAD MAX SECA (gr/cm ³)	1.96	1.957	1.9585
HUMEDAD OPTIMA %	12.3	12	12.15

Fuente. Los autores

8.4.4 CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR

➤ MUESTRA 1

Figura 35 Densidad seca Vs CBR



Fuente. Los autores

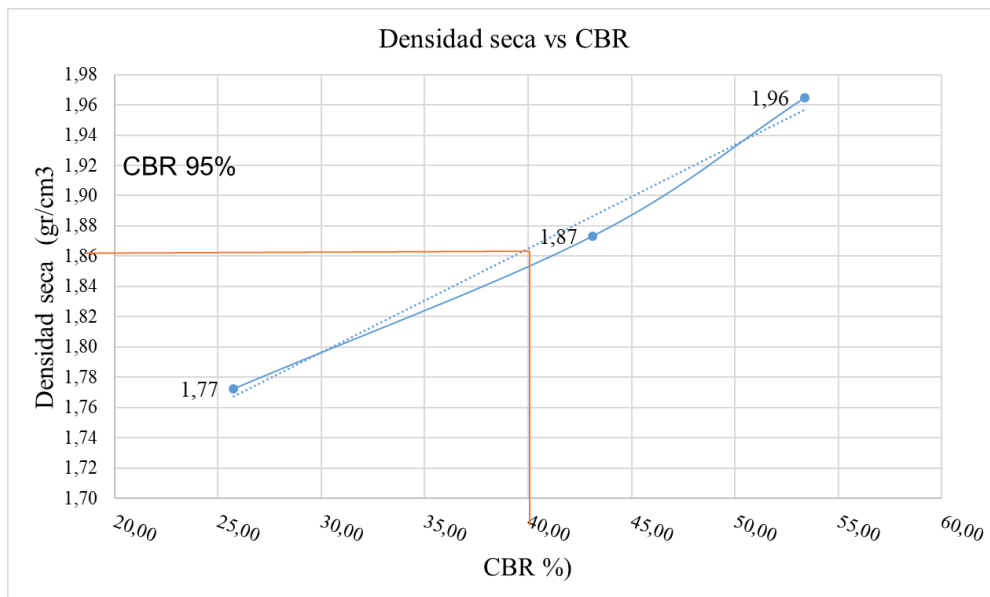
Tabla 58 Datos finales CBR

Densidad máxima	1.9515
Humedad optima	12.2%
95% Densidad Max	1,861
CBR 95%	42

Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

Figura 36 Densidad seca Vs CBR



Fuente. Los autores

Tabla 59 Datos finales CBR

Densidad máxima	1.9515
Humedad optima	11.4%
95% Densidad Max	1,861
CBR 95%	41

Fuente. Los autores

Los resultados del ensayo de CBR de la muestra del suelo más BioCEC 6.0 % fueron promediados, a continuación, presentamos la tabla resumen.

Tabla 60 CBR Promedio 6.0 %

CBR BIOCEC 6,0%		
	MUESTRA 1	MUESTRA 2
HUMEDAD OPTIMA (%)	11,4	11,4
DENSIDAD SECA MAX (95%)	1,861	1,861
CBR (95%)	42	41
CBR PROMEDIO		42

Fuente. Los autores

8.4.5 CORTE DIRECTO

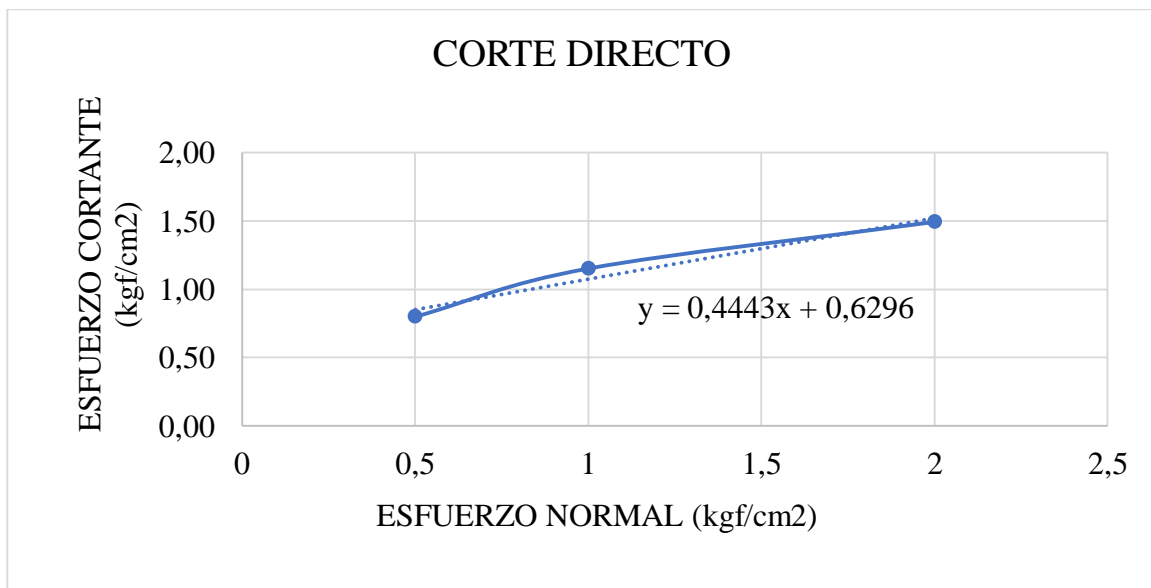
➤ MUESTRA 1

Tabla 61 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 1

CORTE DIRECTO 6.0 % BioCEC		
Carga (Kgf)	Esfuerzo T (Kgf/cm ²)	Esfuerzo σ (Kgf/cm ²)
24.954	0.80	0.5
35.940	1.15	1
46.560	1.49	2

Fuente. Los autores

Figura 37 Corte directo 6.0% BioCEC muestra 1



Fuente. Los autores

Tabla 62 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 1

Cohesión (kg/cm²)	0.6296
Angulo de fricción (°)	23.96

Fuente. Los autores

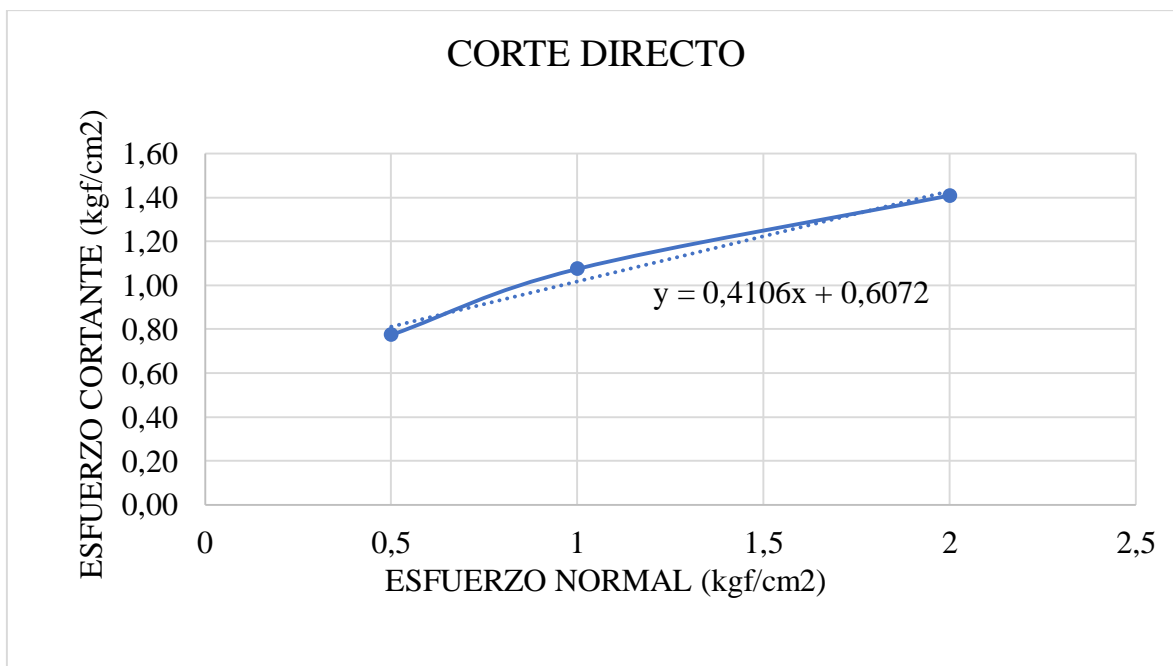
➤ MUESTRA 2

Tabla 63 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 2

CORTE DIRECTO 6.0 % BioCEC		
Carga (Kgf)	Esfuerzo T (Kgf/cm²)	Esfuerzo σ' (Kgf/cm²)
24.159	0.77	0.5
33.540	1.08	1
43.970	1.41	2

Fuente. Los autores

Figura 38 Corte directo 6.0% BioCEC muestra 2



Fuente. Los autores

Tabla 64 Corte directo 6.0 % BioCEC muestra 2

Cohesión (kg/cm²)	0.6072
Angulo de fricción (°)	22.32

Fuente. Los autores

A continuación, se presenta el promedio de los ensayos de corte directo realizados al suelo natural (CL) con 6.0 % de BioCEC:

Tabla 65 Resumen corte directo 6.0 % BioCEC

CORTE DIRECTO BIOCEC 6%			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
COHESION (kg/cm²)	0.6296	0.6072	0.618
ANGULO DE FRICCION (°)	23.96	22.32	23.140

Fuente. Los autores

8.4.6 COMPRESION SIMPLE

➤ MUESTRA 1

Tabla 66 Compresión simple 6.0 % BioCEC muestra 1

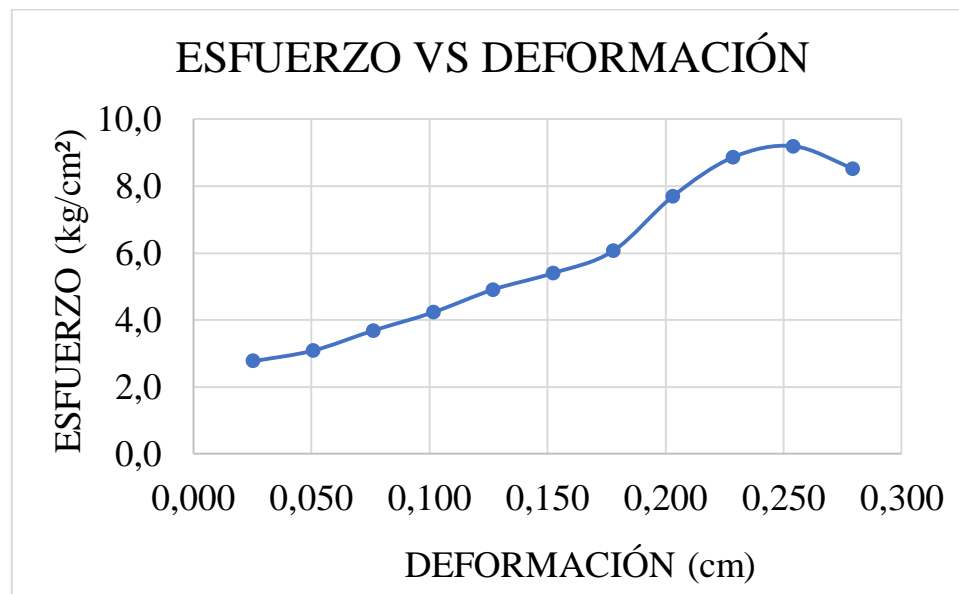
COMPRESION SIMPLE 6.0 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0
26.76	0.025	2.772
29.94	0.051	3.090
35.83	0.076	3.685
41.28	0.102	4.230
48.08	0.127	4.909

53.07	0.152	5.399
58.51	0.178	6.060
67.59	0.203	7.697
79.38	0.229	8.855
88.00	0.254	9.187
91.63	0.279	8.519

qu (kg/cm²)	9.187	Cu (kg/cm²)	4.594
-------------------------------	-------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 39 Compresión simple muestra 1



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

Tabla 67 Compresión simple 6.0 % BioCEC muestra 2

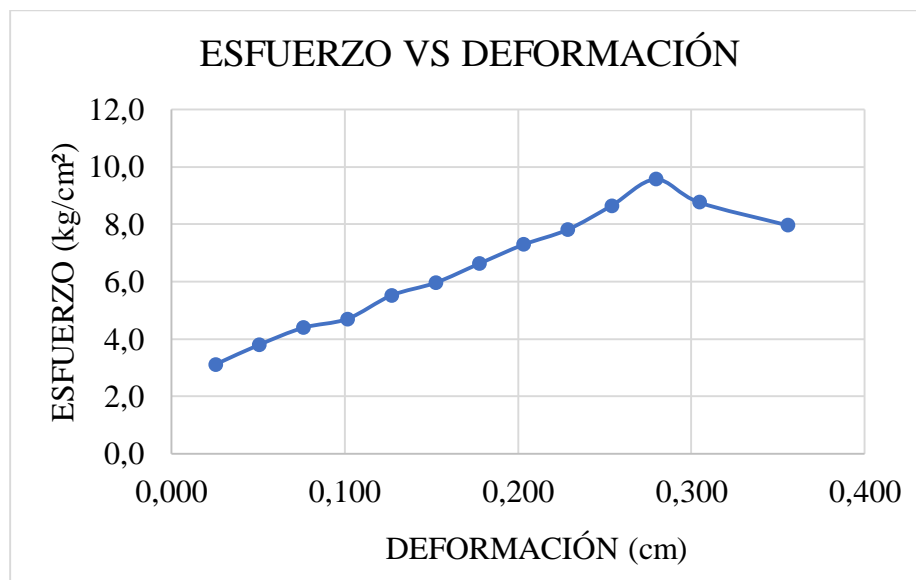
COMPRESION SIMPLE 6.0 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0

29,94	0,025	3,101
36,74	0,051	3,792
42,64	0,076	4,385
45,81	0,102	4,694
53,98	0,127	5,511
58,51	0,152	5,953
63,96	0,178	6,624
72,12	0,203	7,284
77,57	0,229	7,806
86,18	0,254	8,641
95,71	0,279	9,561
88,00	0,305	8,759
80,29	0,356	7,962

qu (kg/cm²)	9,561	Cu (kg/cm²)	4,781
-------------------------------	-------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 40 Compresión simple muestra 2



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 3

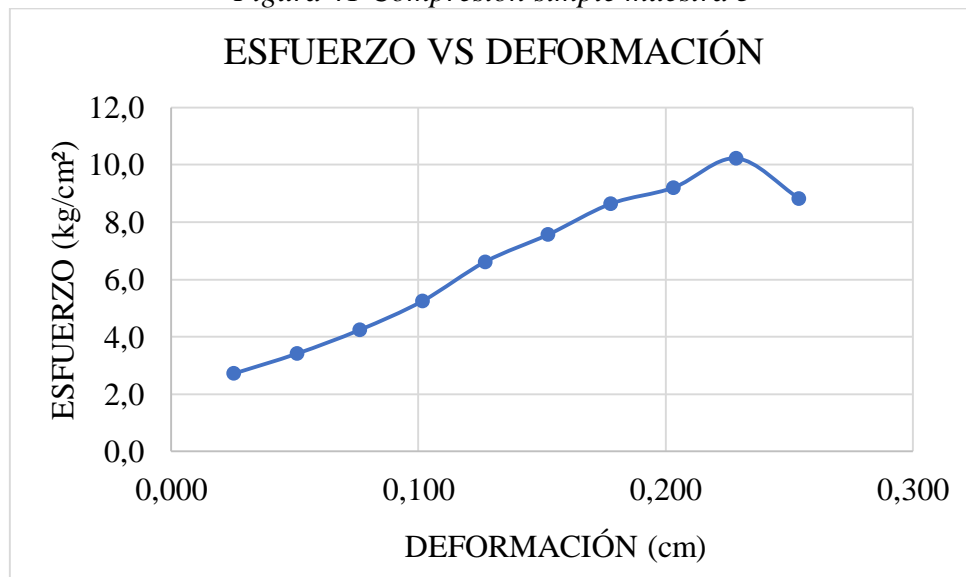
Tabla 68 Compresión simple 6.0% BioCEC muestra 3

COMPRESION SIMPLE 6.0 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0
26.31	0.025	2.725
33.11	0.051	3.417
41.28	0.076	4.245
51.26	0.102	5.252
64.86	0.127	6.623
74.39	0.152	7.568
83.46	0.178	8.644
91.17	0.203	9.208
101.61	0.229	10.225
88.00	0.254	8.823

qu (kg/cm²)	10.225	Cu (kg/cm²)	5.113
-------------------------------	--------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 41 Compresión simple muestra 3



Fuente. Los autores

A continuación, se presenta el promedio de los ensayos de compresión simple realizados al suelo (CL) con 6.0 % de BioCEC, los resultados fueron los siguientes:

Promedio compresión simple 6.0 % BioCEC

COMPRESIÓN SIMPLE 6.0 % BIOCEC				
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
qu (kg/cm²)	9.187	9.561	10.225	9.658
Cu(kg/cm²)	4.5935	4.7805	5.1125	4.829

Fuente. Los autores

8.5 ESTABILIZACION DEL SUELO CON 6.6% BioCEC

Para la estabilización del suelo natural (CL) se estableció un porcentaje de 6.6 % del estabilizante iónico BioCEC.

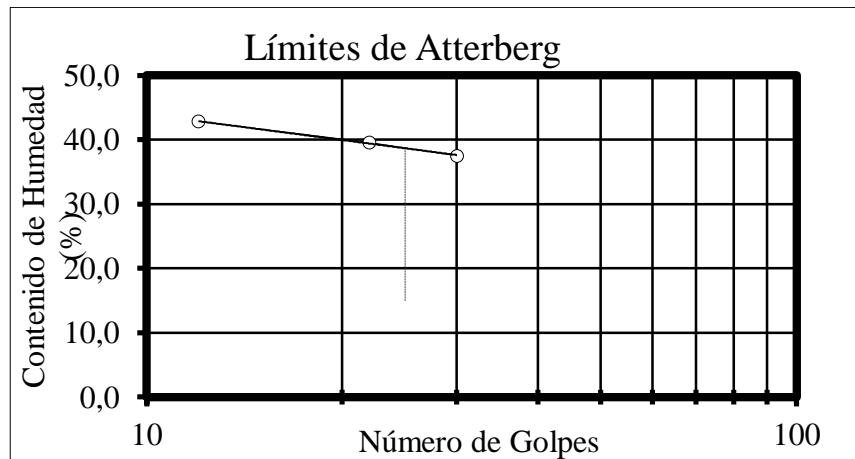
8.5.1 LIMITES DE ATTERBERG

A continuación, se describen los ensayos de límites de Atterberg realizados el suelo con BioCEC del 6.6 %

8.5.1.1 LIMITE LIQUIDO

➤ MUESTRA 1

Figura 42 Limite liquido 6.6% muestra 1

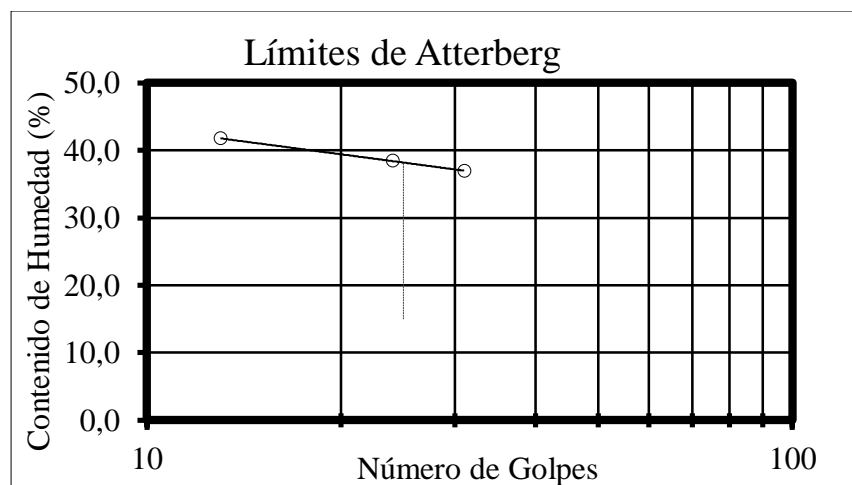


Fuente. Los autores

La primera muestra da un porcentaje de limite liquido de 38.7%

➤ MUESTRA 2

Figura 43 Limite liquido 6.6% muestra 2

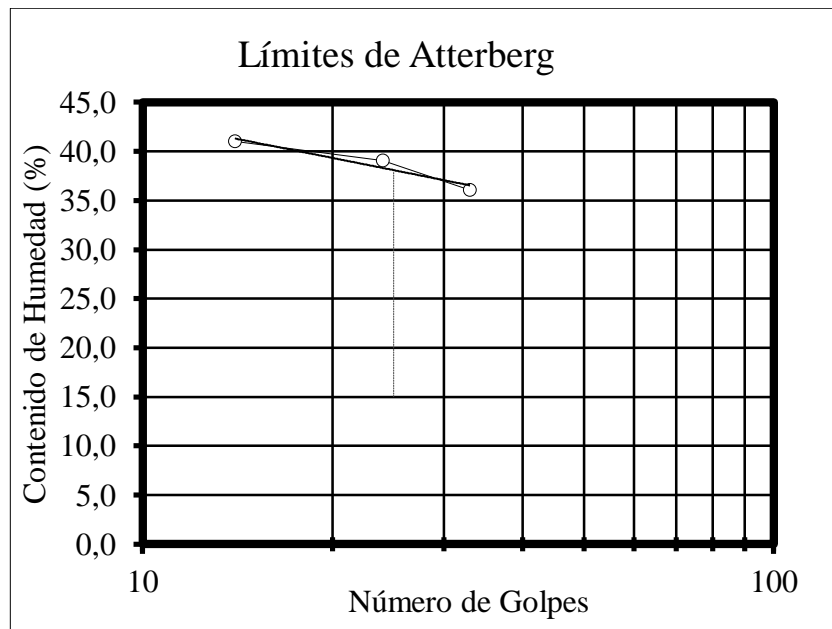


Fuente. Los autores

La segunda muestra da un porcentaje de limite liquido de 38.2%

➤ MUESTRA 3

Figura 44 Limite liquido 6.6% muestra 3



Fuente. Los autores

La tercera muestra da un porcentaje de limite liquido de 38%

Los resultados del ensayo de limite liquido realizado en las tres muestras de suelo estabilizado con 6.6% de BioCEC fueron promediados dando como resultado final un Limite Liquido del 38.3%

8.5.1.2 LIMITE PLASTICO

➤ Muestra 1

Tabla 69 Limite plástico 6.6% muestra 1

% HUMEDAD	
1	21.73
2	21.62

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 21.7%

➤ Muestra 2

Tabla 70 Limite plástico 6.6% Muestra 2

% HUMEDAD	
1	21.46
2	21.21

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 21.33%

➤ Muestra 3

Tabla 71 Limite plástico 6.6% Muestra 3

% HUMEDAD	
1	21.70
2	20.97

Fuente. Los autores

LIMITE PLASTICO 21.3 %

Se realiza el promedio dando como resultado un porcentaje de Limite Plástico de 21.4%

Tabla 72 Resultado limites 6.6% BioCEC

Limite liquido
38.3
Limite Plástico
21.4
Índice de Plasticidad
17

Fuente. Los autores

Los valores obtenidos de los límites del suelo con 6.6% BioCEC dan un resultado óptimo para la estabilización del suelo disminuyendo su contenido de humedad.

8.5.2 LIMITE DE CONTRACCION

Tabla 73 Limite de contracción

LÍMITES DE CONTRACCIÓN					
BioCEC 6.6 %					
HUMEDAD (%)	PESO SUELO SECO (gr)	VOLUMEN (cm3)	VOLUMEN (cm3)	PESO DEL AGUA (gr/cm3)	LC
43.26	18.41	13.98	9.89	1.00	21.04

Fuente. Los autores

Finalizado el ensayo, se obtuvieron los resultados ya presentados en la anterior tabla y como resultado nos da un valor de limite contracción: 21.04

8.5.3 PROCTOR MODIFICADO

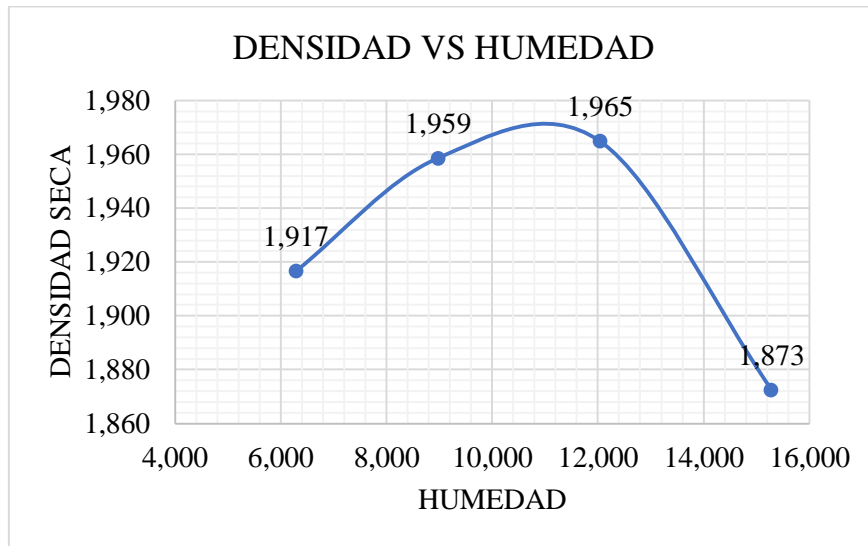
➤ MUESTRA 1

Tabla 74 Proctor 6.6% BioCEC muestra 1

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm3)	1.97
HUMEDAD OPTIMA %	11.5

Fuente. Los autores

Figura 45 Proctor 6.6% BioCEC muestra 1



Fuente. Los autores

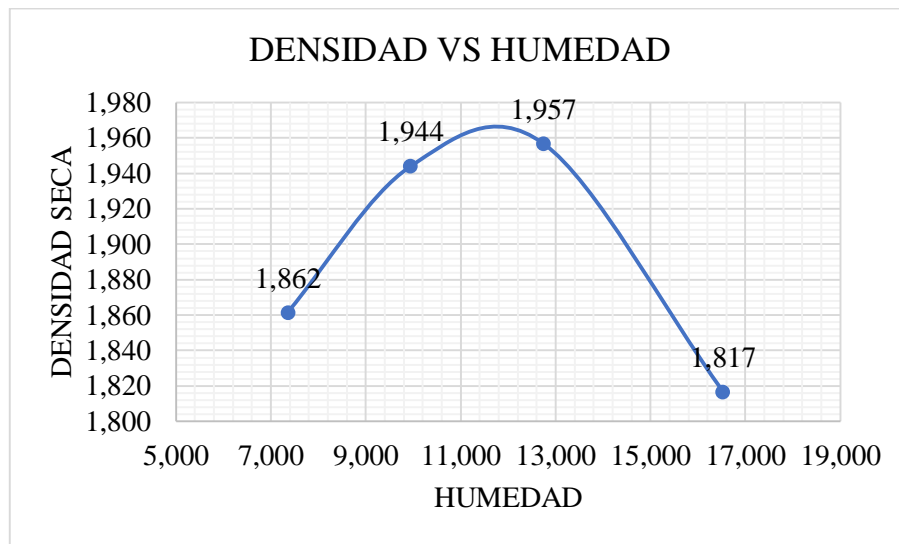
➤ MUESTRA 2

Tabla 75 Proctor 6.6% BioCEC muestra 2

DENSIDAD MAX SECA (gr/cm³)	1.968
HUMEDAD OPTIMA %	11.3

Fuente. Los autores

Figura 46 Proctor 6.6% BioCEC muestra 2



Fuente. Los autores

El resultado de humedad (%) obtenido mediante el proceso del ensayo de Proctor modificado en las dos muestras con 6.6% BioCEC es del 11.4 %

Tabla 76 Promedio Proctor 6.6% BioCEC

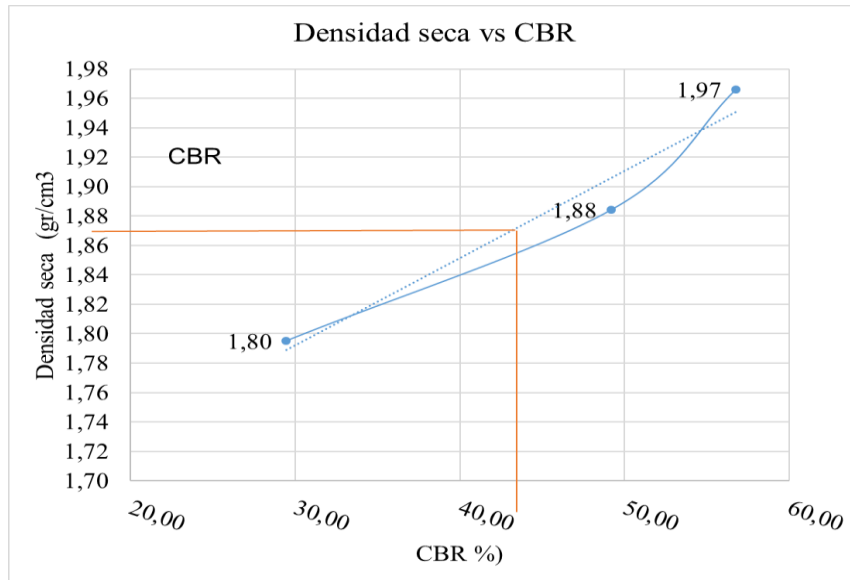
PROCTOR MODIFICADO			
SUELO BIOCEC 6,6 %			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
DENSIDAD MAX SECA (gr/cm ³)	1.97	1.968	1.9690
HUMEDAD OPTIMA %	11.5	11.3	11.40

Fuente. Los autores

8.5.4 CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR

➤ MUESTRA 1

Figura 47 Densidad seca Vs CBR



Fuente. Los autores

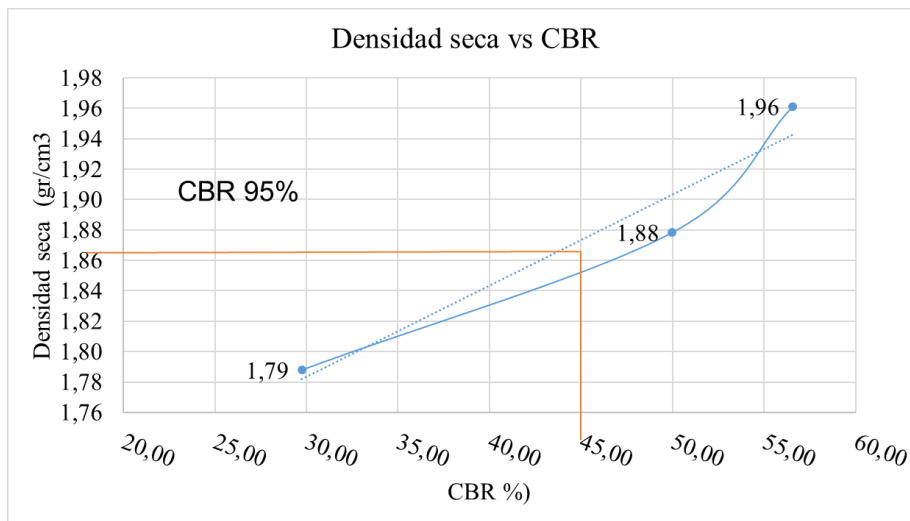
Tabla 77 Datos finales CBR

Densidad máxima	1.9690
Humedad optima	11.4%
95% Densidad Max	1,871
CBR 95%	44

Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

Figura 48 Densidad seca Vs CBR



Fuente. Los autores

Tabla 78 Datos finales CBR

Densidad máxima	1.9690
Humedad optima	11%
95% Densidad Max	1,871
CBR 95%	45

Fuente. Los autores

8.5.5 CORTE DIRECTO

➤ MUESTRA 1

Tabla 79 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 1

CORTE DIRECTO 6.6 % BioCEC		
Carga (Kgf)	Esfuerzo T (Kgf/cm ²)	Esfuerzo σ (Kgf/cm ²)
28,610	0,92	0,5
39,150	1,25	1
51,880	1,66	2

Fuente. Los autores

Figura 49 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 1

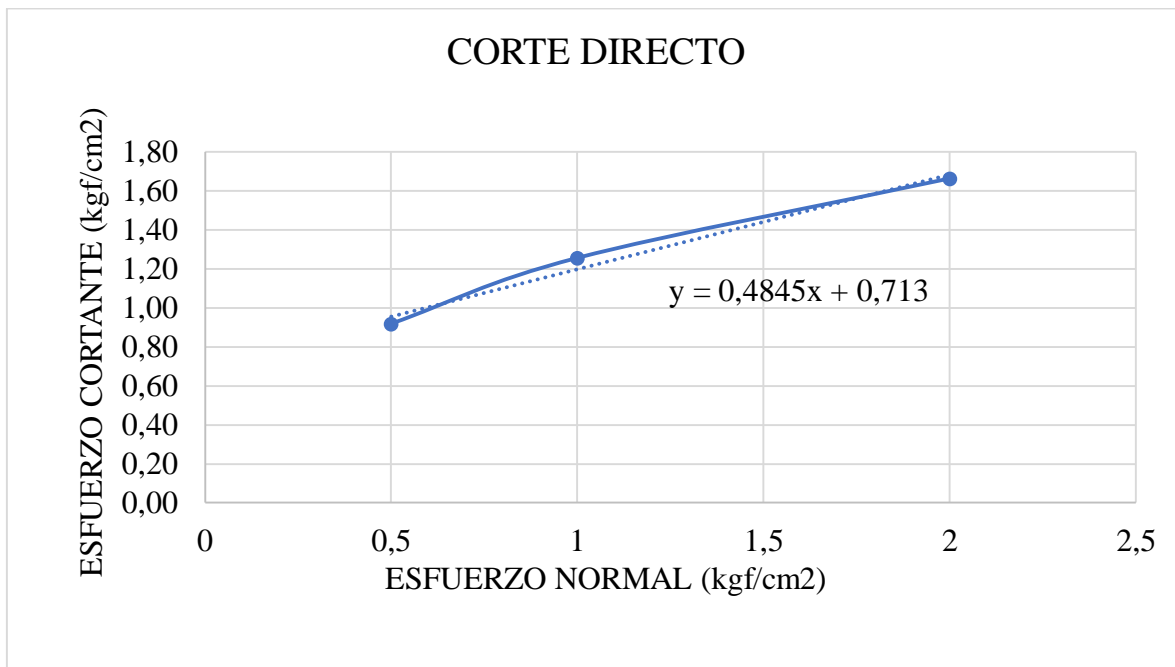


Tabla 80 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 1

Cohesión (kg/cm²)	0.7130
Angulo de fricción (°)	25.85

Fuente. Los autores

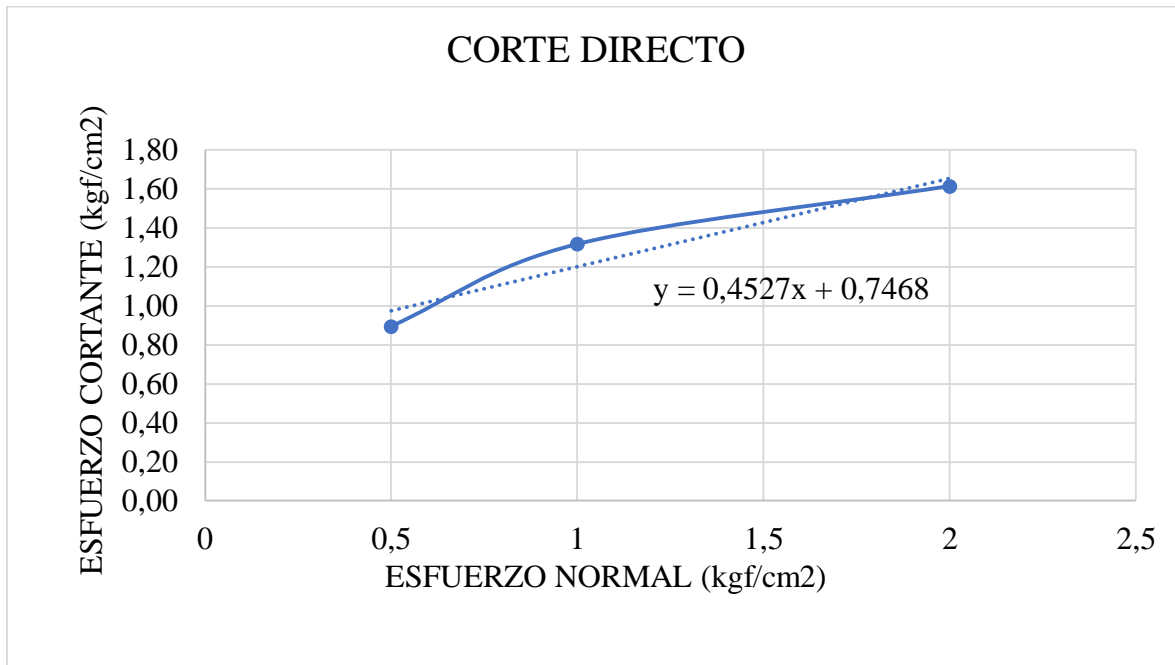
➤ MUESTRA 2

Tabla 81 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 2

CORTE DIRECTO 6.6 % BioCEC		
Carga (Kgf)	Esfuerzo T (Kgf/cm²)	Esfuerzo σ (Kgf/cm²)
27,940	0,90	0,5
41,060	1,32	1
50,340	1,61	2

Fuente. Los autores

Figura 50 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 2



Fuente. Los autores

Tabla 82 Corte directo 6.6 % BioCEC muestra 2

Cohesión (kg/cm²)	0.7468
Angulo de fricción (°)	24.36

Fuente. Los autores

A continuación, se presenta el promedio de los ensayos de corte directo realizados al suelo natural (CL) con 6.6 % de BioCEC

Tabla 83 Resumen corte directo 6.6 % BioCEC

CORTE DIRECTO BIOCEC 6.6 %			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
COHESION (kg/cm²)	0.713	0.7468	0.730
ANGULO DE FRICCIÓN (°)	25.85	24.36	25.105

Fuente. Los autores

8.5.6 COMPRESION SIMPLE

➤ MUESTRA 1

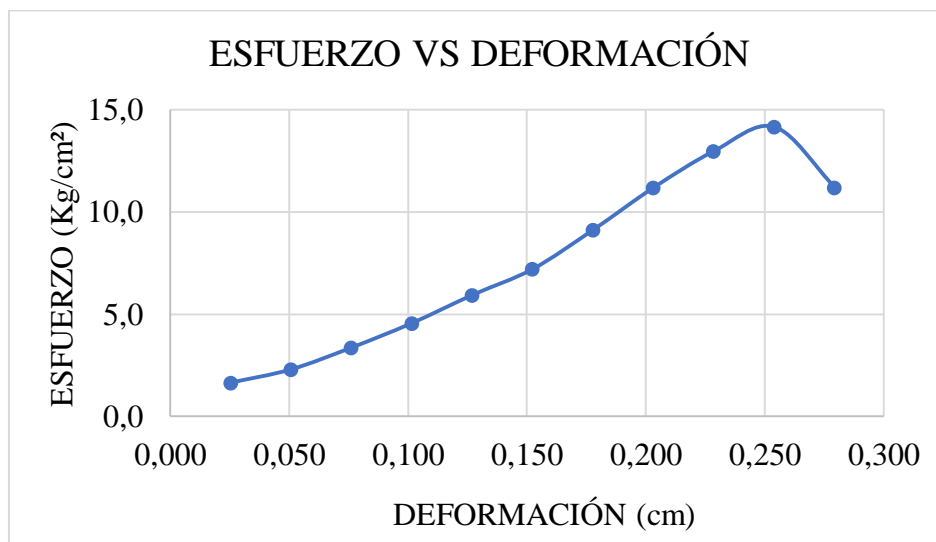
Tabla 84 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 1

COMPRESION SIMPLE 6.6 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0
15,88	0,025	1,644
22,23	0,051	2,294
32,66	0,076	3,359
44,45	0,102	4,555
58,06	0,127	5,928
70,76	0,152	7,199
88,00	0,178	9,114
110,68	0,203	11,178
128,82	0,229	12,964
141,07	0,254	14,144
112,04	0,279	11,192

qu (kg/cm²)	14,144	Cu (kg/cm²)	7,072
-------------------------------	--------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 51 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 1



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 2

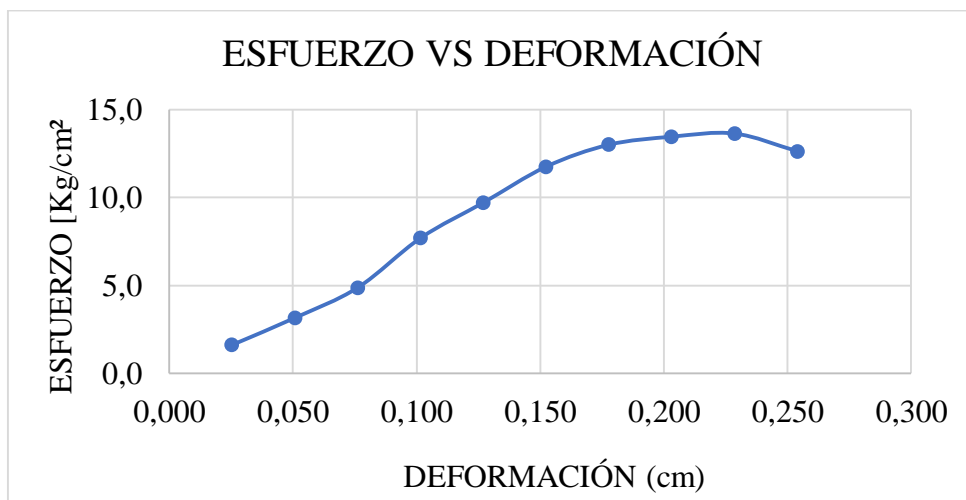
Tabla 85 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 2

COMPRESION SIMPLE 6.6 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0
15,88	0,025	1,644
30,84	0,051	3,183
47,63	0,076	4,898
75,30	0,102	7,716
95,26	0,127	9,726
115,67	0,152	11,767
125,65	0,178	13,013
133,36	0,203	13,469
135,63	0,229	13,648
126,10	0,254	12,643

qu (kg/cm²)	13,648	Cu (kg/cm²)	6,824
-------------------------------	--------	-------------------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 52 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 2



Fuente. Los autores

➤ MUESTRA 3

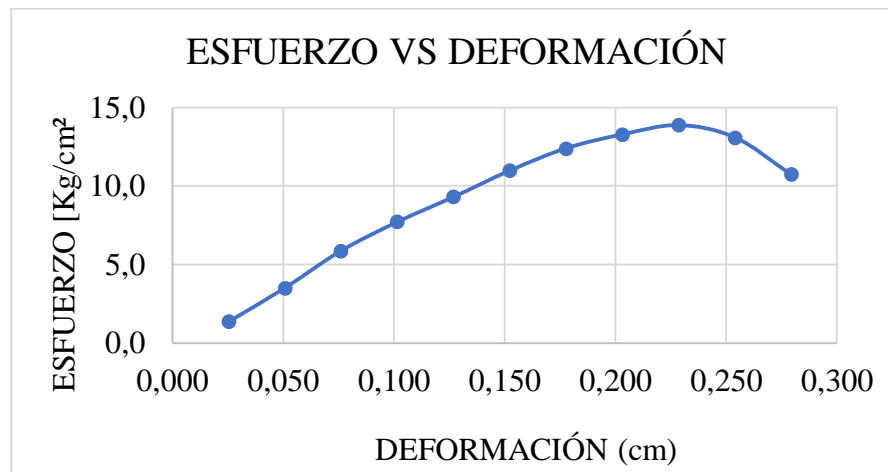
Tabla 86 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 3

COMPRESION SIMPLE 6.6 % BioCEC		
CARGA (kg)	DEFORMACION (cm)	ESFUERZO (kg/cm²)
0	0	0
13,15	0,025	1,362
34,02	0,051	3,511
57,15	0,076	5,877
75,30	0,102	7,716
91,17	0,127	9,309
107,96	0,152	10,983
119,75	0,178	12,403
131,54	0,203	13,286
137,89	0,229	13,877
130,64	0,254	13,098
107,50	0,279	10,739

69,4008	13,877	cu (kg/cm2)	6,938
----------------	--------	--------------------	-------

Fuente. Los autores

Figura 53 Compresión simple 6.6 % BioCEC muestra 3



Fuente. Los autores

A continuación, se presenta el promedio de los ensayos de compresión simple realizados al suelo (CL) con 6.6 % de BioCEC, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 87 Promedio compresión simple 6.6 % BioCEC

COMPRESIÓN SIMPLE SUELO 6.6 % BIOCEC				
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
qu (kg/cm²)	14.144	13.648	13.877	13.890
Cu(kg7cm²)	7.072	6.824	6.9385	6.945

Fuente. Los autores

- Contrastar el proceso constructivo y de rentabilidad del método (MEI), realizando una comparación respecto a los métodos suelo-cal y suelo-cemento.

9 ANALISIS DE RESULTADOS SUELO NATURAL (CL) MEJORADO CON BIOCEC

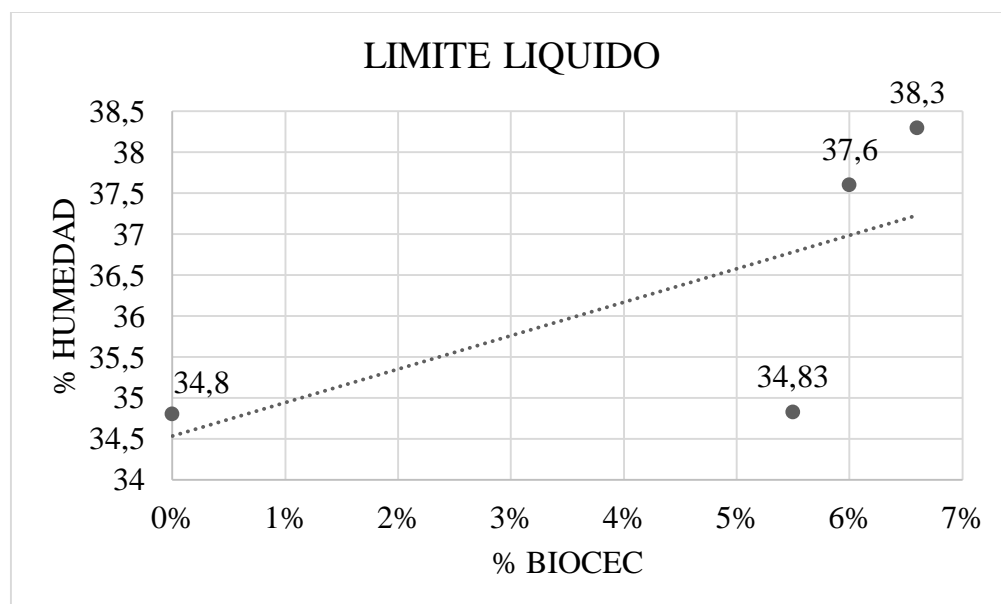
Después de obtener los resultados realizados al suelo natural (CL) que fue sometido a varios ensayos, estos resultados se analizaron y se describirán a continuación.

9.1 LIMITES DE ATTERBERG

9.1.1 LIMITE LIQUIDO

Se puede observar que a medida que se adiciona mayor porcentaje de solución de BioCEC, presenta un leve incremento en el porcentaje de humedad.

Figura 54 Análisis limite liquido

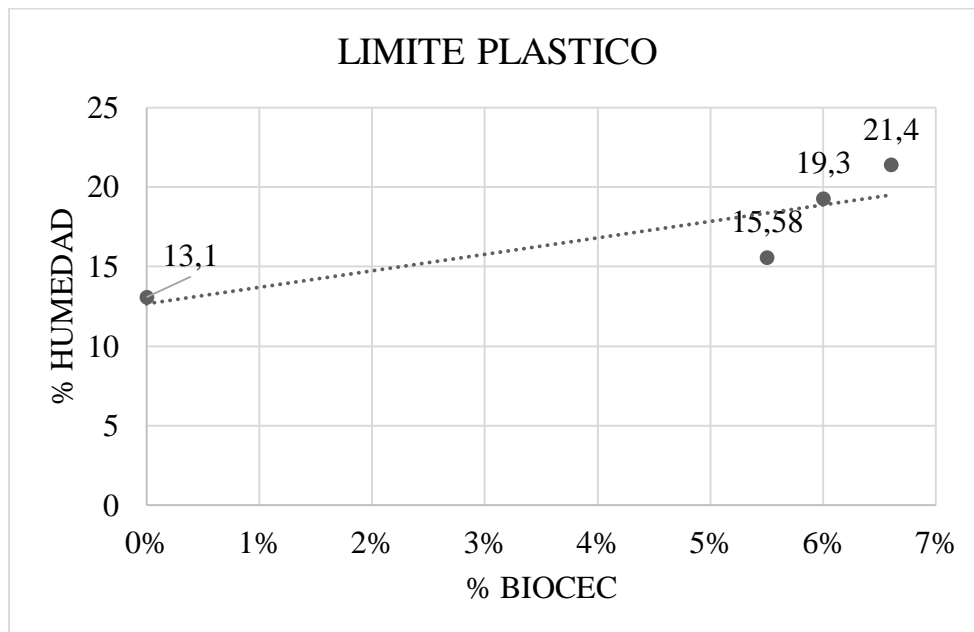


Fuente. Los autores

9.1.2 LIMITE PLASTICO

De igual forma que el límite líquido, el límite plástico presenta un incremento en su porcentaje de humedad a mayor contenido de solución de BioCEC.

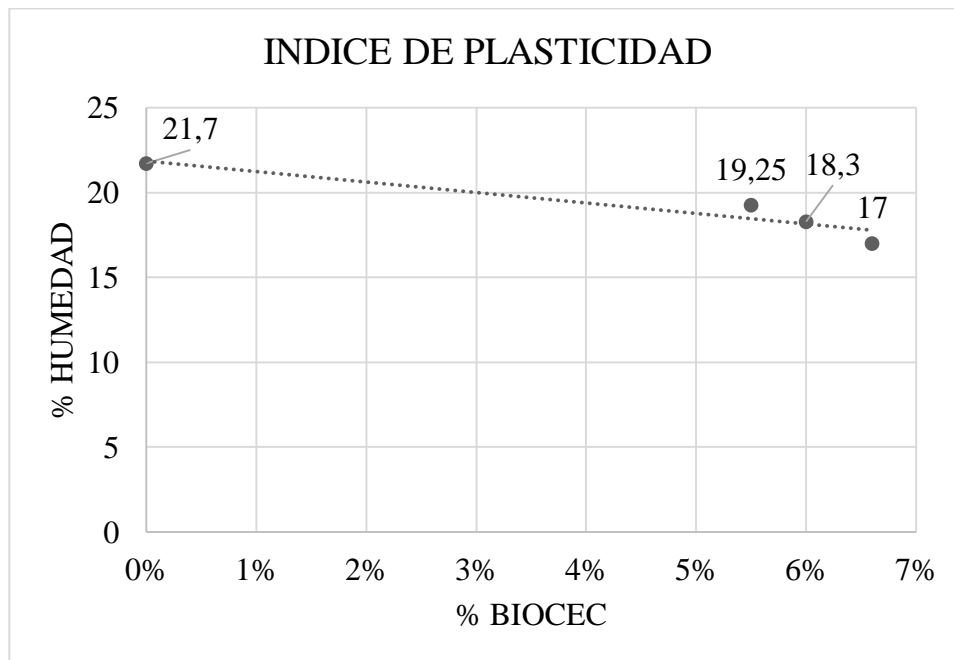
Figura 55 Análisis limite plástico



Fuente. Los autores

9.2 INDICE DE PLASTICIDAD

Se observa que el índice de plasticidad tiene una disminución al momento de la adición de la solución de BioCEC al suelo arcilloso (CL), generando así, que este pase del esta semisólido al líquido, adicionándole menos cantidad de agua, a la que necesita inicialmente el suelo natural.

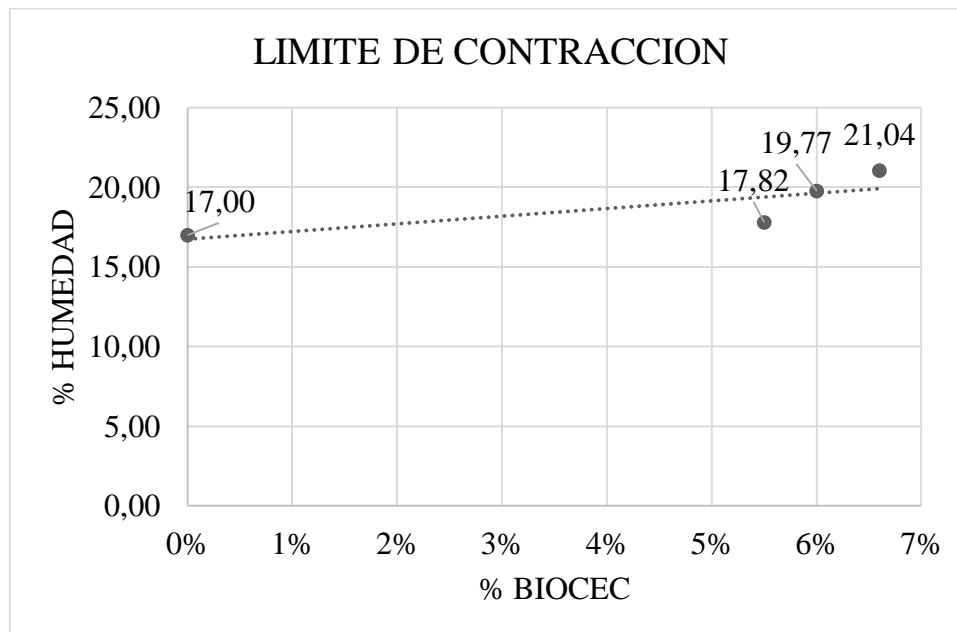
Figura 56 Análisis índice de plasticidad

Fuente. Los autores

9.3 LIMITE DE CONTRACCION

Se observa un incremento en el límite de contracción del suelo natural al momento de adicionarle la solución de BioCEC. El límite de contracción aumenta, ya que la muestra de suelo más BioCEC necesitara más contenido de agua para que la muestra sufra una reducción en su volumen original.

Figura 57 Análisis límite de contracción

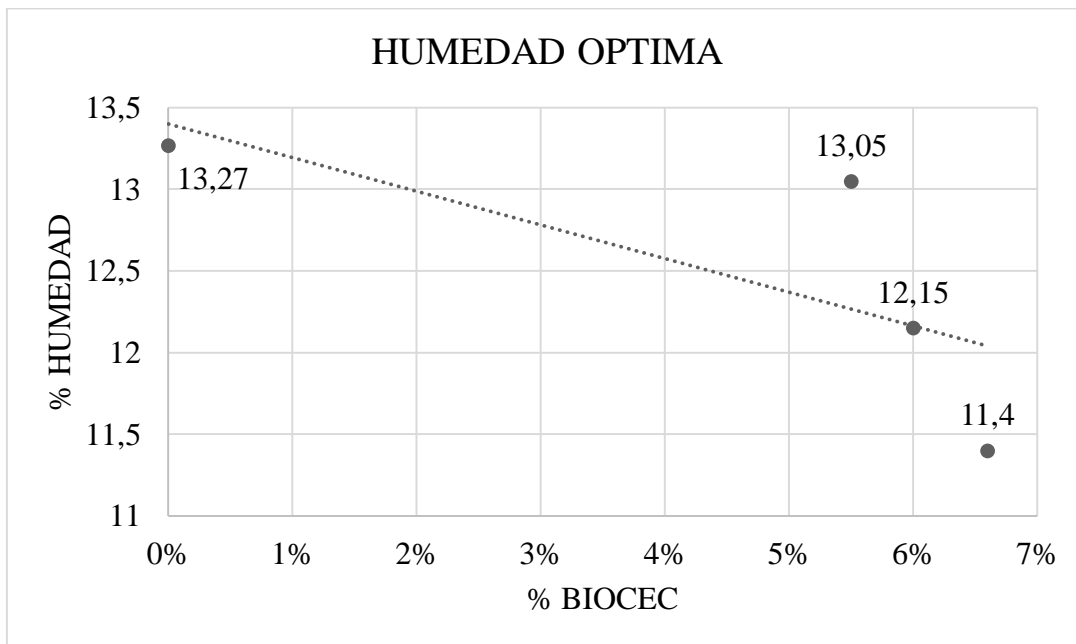


Fuente. Los autores

9.4 PROCTOR MODIFICADO

A mayor contenido de solución de BioCEC, la humedad óptima del suelo arcilloso fue disminuyendo, debido a que este químico estabilizante tiene como característica intercambiar las partículas de agua por BioCEC, lo que permite el sellar las partículas del suelo y liberar el contenido de agua por adsorción que contiene cada partícula del mismo.

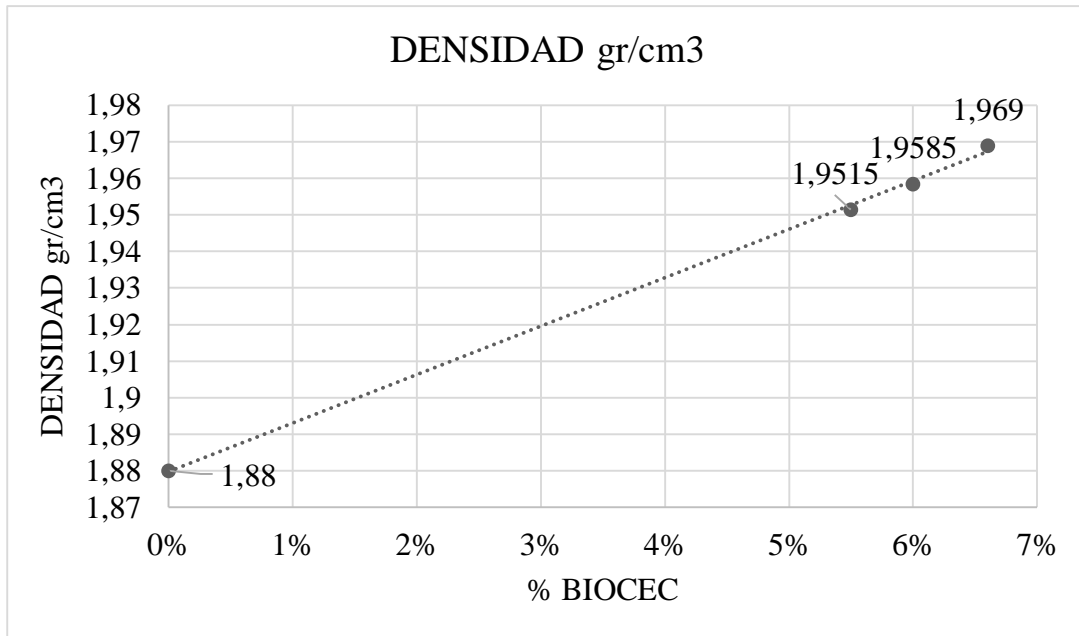
Figura 58 Análisis Proctor- humedad optima



Fuente. Los autores

En este ensayo de Proctor modificado se obtuvo una densidad de 1,88 gr/cm³ de suelo, sabemos que al incrementar el peso de la muestra del ensayo esta aumentará su densidad, debido a que son directamente proporcionales, al momento de adicionarle la dosificación de BioCEC la densidad aumentó, generando una mejoría de este, permitiendo utilizar el suelo en diferentes tipos de servicios, como son rellenos o subrasantes admitidas en un diseño vial.

Figura 59 Análisis Proctor- densidad



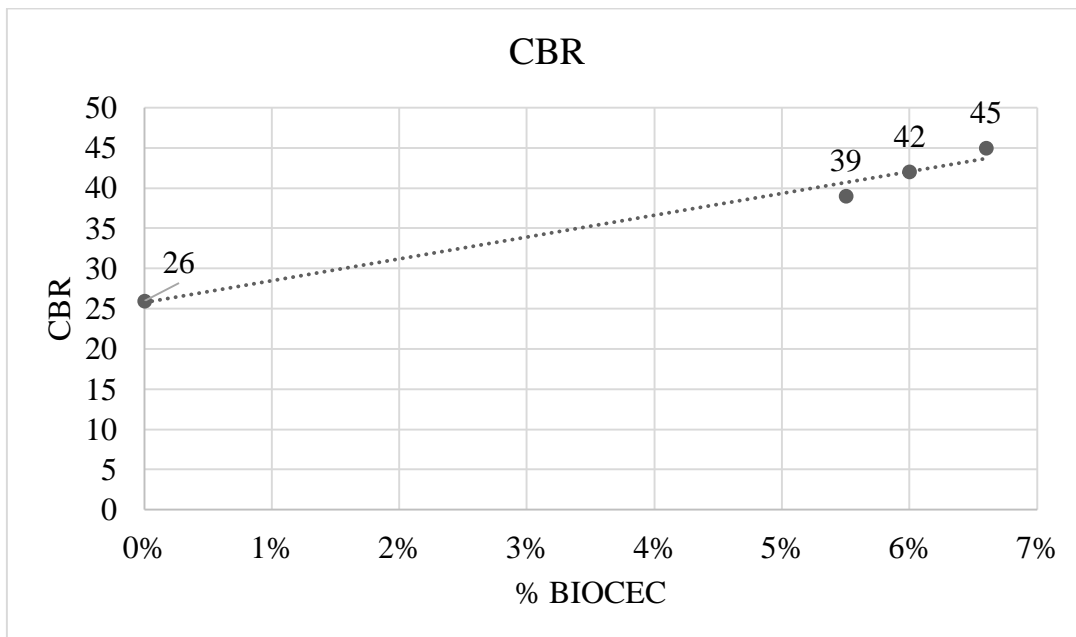
Fuente. Los autores

9.5 CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR

El ensayo de CBR evidencia un incremento en sus valores, debido a que se le adiciono una dosificación de BioCEC, estos ensayos fueron realizados de forma no sumergida, ya que la composición (Suelo+ BioCEC) contienen una dosificación que se ve representada en los porcentajes ya antes descritos (5.5,6.0,6.6 %) y no pueden alterados, en este caso de forma saturada.

El incremento del CBR con la dosificación optima del 6.6% fue de 74 % por lo que a mayor cantidad de BioCEC mayor capacidad de carga.

Figura 60 Análisis CBR



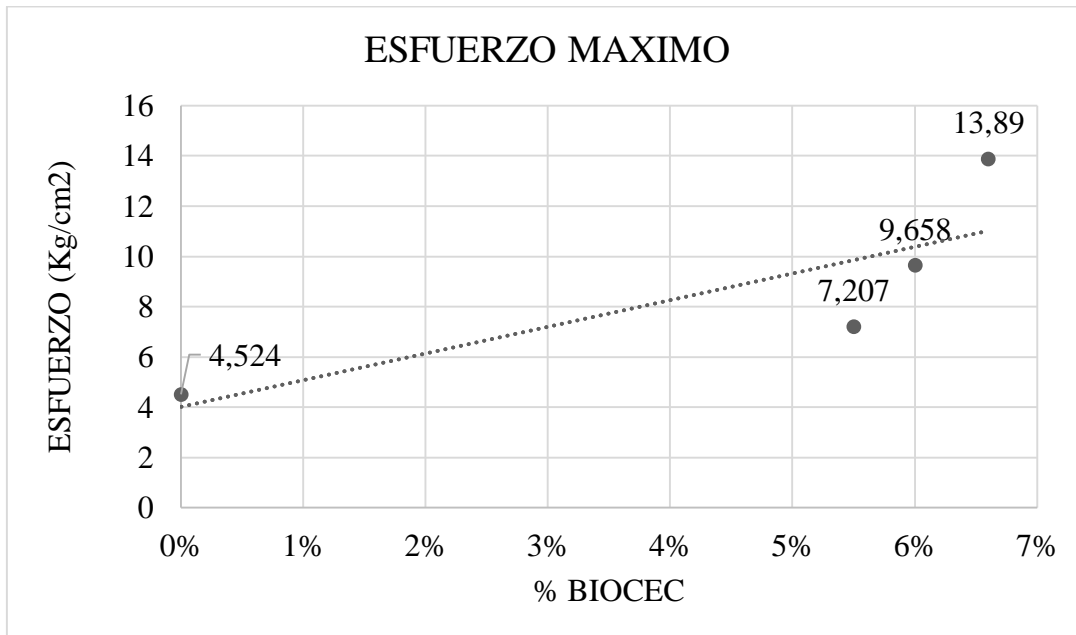
Fuente. Los autores

9.6 COMPRESION SIMPLE

Se evidencia un incremento en los valores esfuerzo obtenidos del ensayo de compresión simple, al mejorarlo con la dosificación de BioCEC el suelo alcanza valores hasta de 13.89 con la dosifican establecida del químico (6.6 %).

Al mejorar el suelo arcilloso con BioCEC y evidenciar que los esfuerzos aumentan a medida que la carga aumenta, este tipo de suelo puede ser usado para soportar dichas estructuras o como subrasantes.

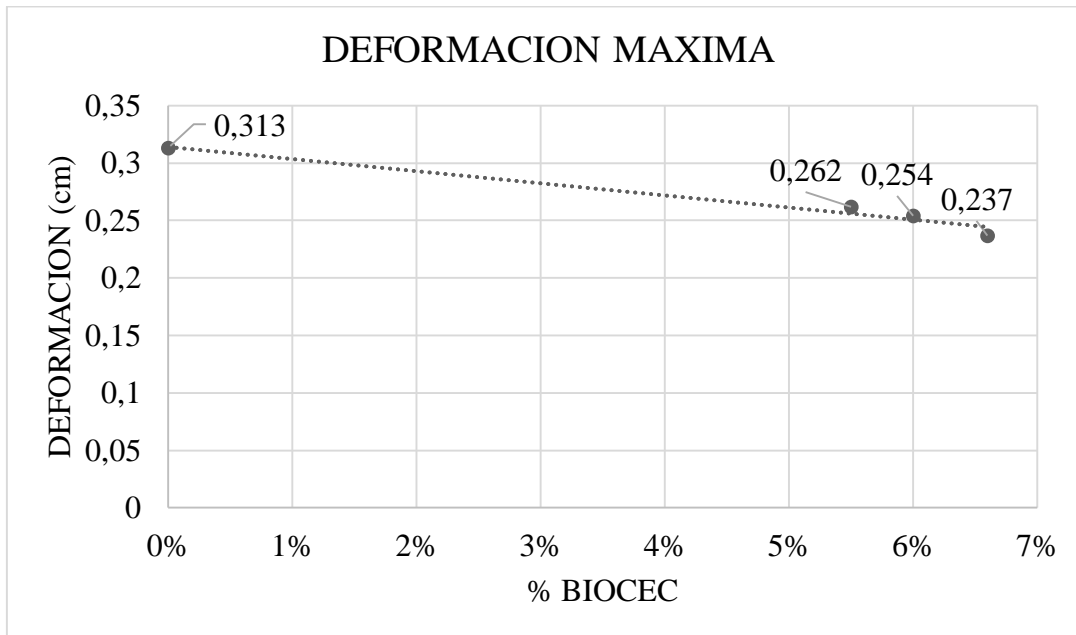
Figura 61 Análisis compresión simple-Esfuerzo Máximo



Fuente. Los autores

Se evidencia una leve disminución respecto a la altura inicial del espécimen que fue fallado, es decir que a medida que se le adiciona la solución de BioCEC la deformación es menor, a cargas más elevadas, siendo acordes con los esfuerzos analizados en la anterior figura, se puede decir que este suelo mejorado puede ser utilizado en perfiles viales como subrasante.

Figura 62 Análisis compresión simple-Deformación Máxima



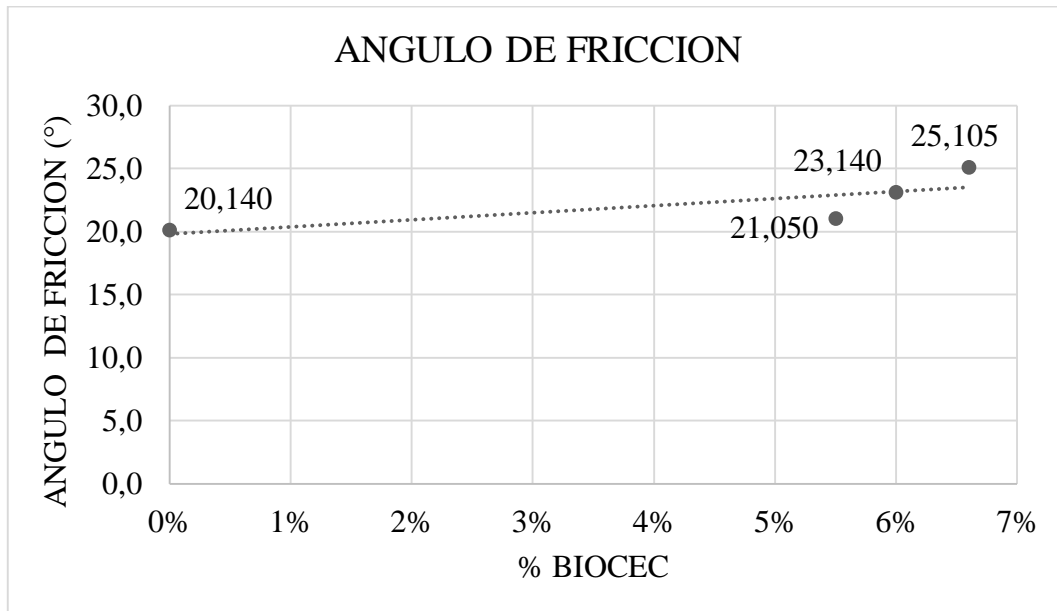
Fuente. Los autores

9.7 CORTE DIRECTO

Se observa que los valores de Angulo de fricción y cohesión aumentaron a medida que la dosificación de BioCEC fue aumentando.

El Angulo de fricción depende de diversos factores entre ellos la densidad, que fue aumentando con mayor dosificación del químico, adicionalmente, una de las características del BioCEC es la unión entre partículas del suelo, generando así un incremento en el ángulo de fricción y capacidad de soporte del suelo.

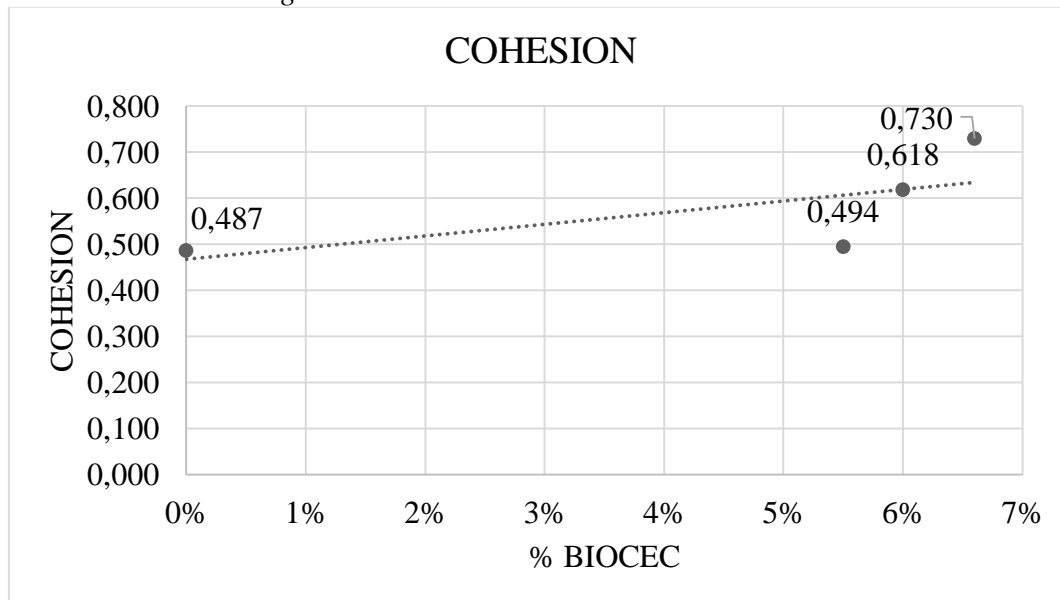
Figura 63 Análisis corte directo-ángulo de fricción



Fuente. Los autores

Al momento de agregar el BioCEC al suelo natural, este trabaja como un agente que realiza una unión entre partículas del mismo suelo y producen fuerzas internas aumentando la adherencia, característico de una arcilla.

Figura 64 Análisis de corte directo-cohesión



Fuente. Los autores

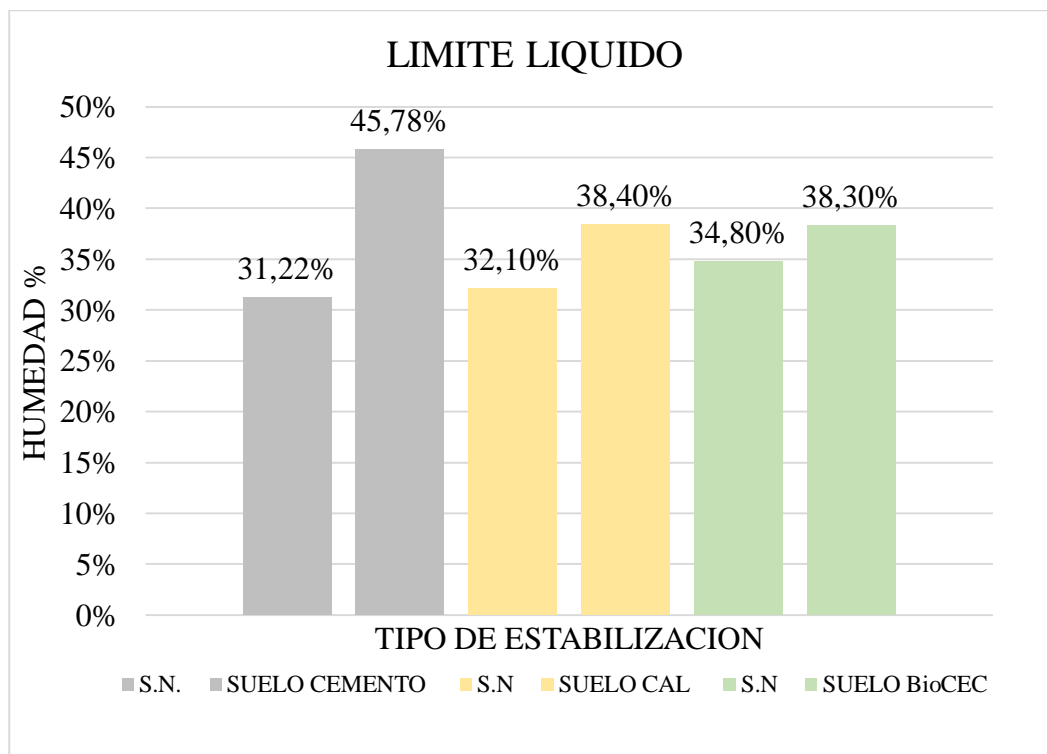
10 ANALISIS MEDIANTE COMPARATIVOS A LOS RESULTADOS DE LOS METODOS DE ESTABILIZACION

Se analizaron los resultados obtenidos de cada método de estabilización realizados en la Universidad Pontificia Bolivariana, con el fin de poder comparar los resultados y analizar las variables que presentaba el suelo arcilloso (CL) en cada uno de los ensayos realizados.

A continuación, presentamos una comparativa entre los ensayos realizados.

10.1 LIMITE LIQUIDO

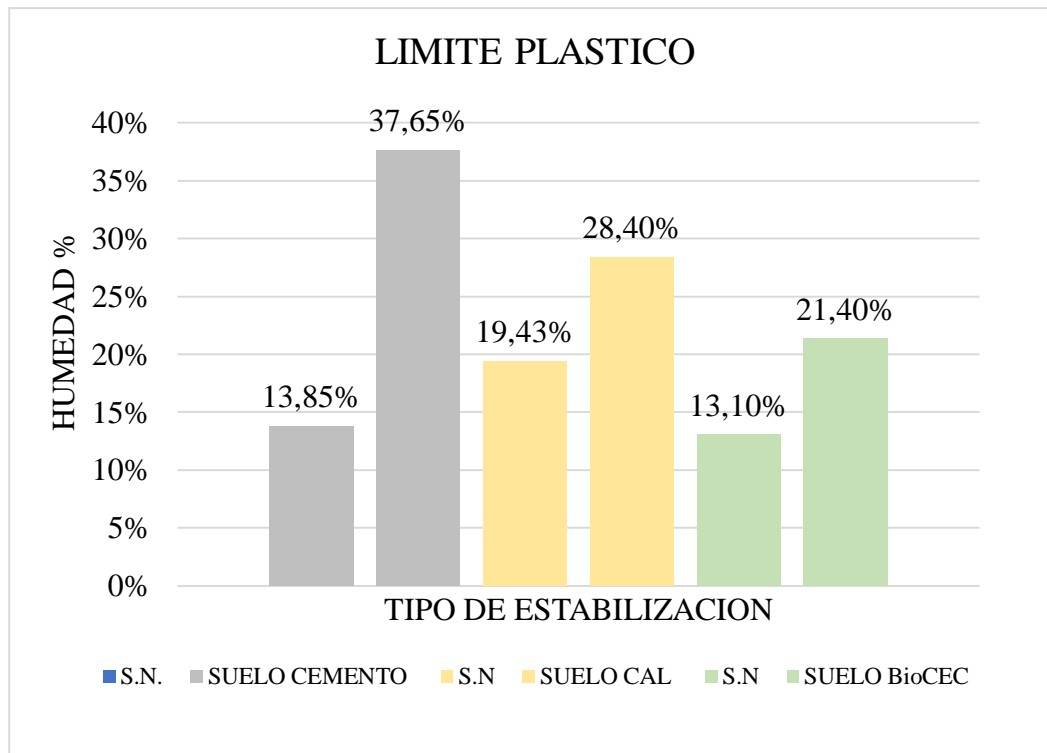
Figura 65 Comparación métodos de estabilización -limite liquido



Fuente. Los autores

10.2 LIMITE PLASTICO

Figura 66 Comparación métodos de estabilización -limite plástico

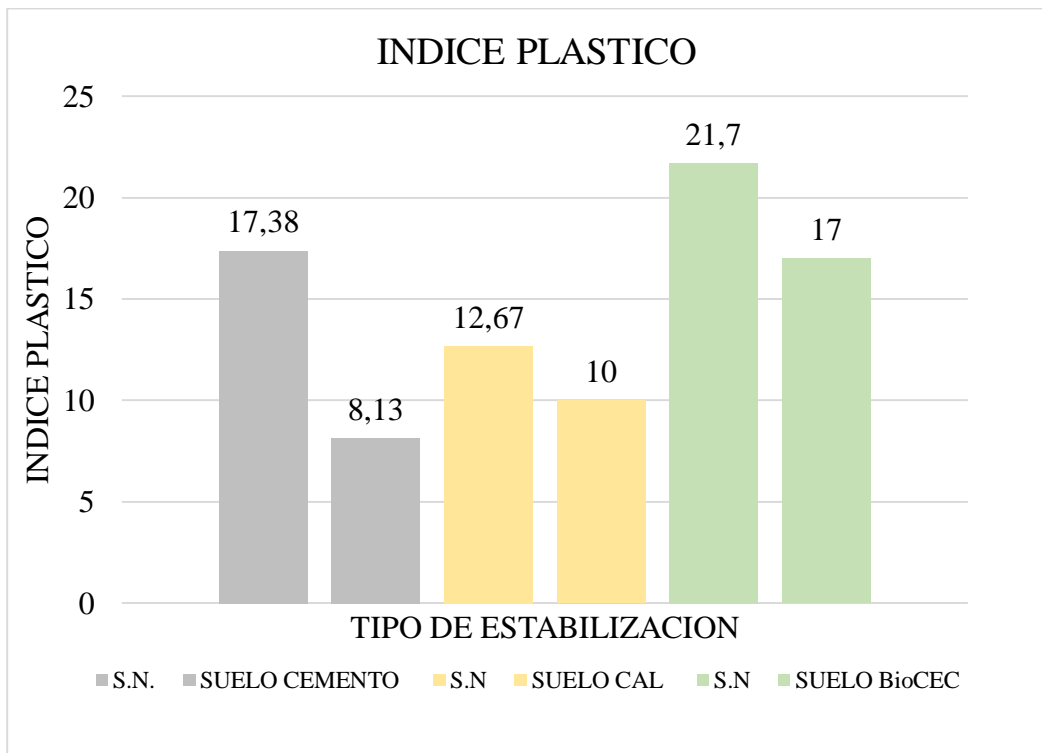


Fuente. Los autores

10.3 INDICE DE PLASTICIDAD

Se puede evidenciar que los tres métodos obtuvieron una disminución en sus índices de plasticidad, la mayor disminución fue del método suelo-cemento con una diferencia de 9.25 %, este valor fue obtenido de la dosificación de 15% de cemento al suelo natural.

Figura 67 Comparación métodos de estabilización - índice plástico

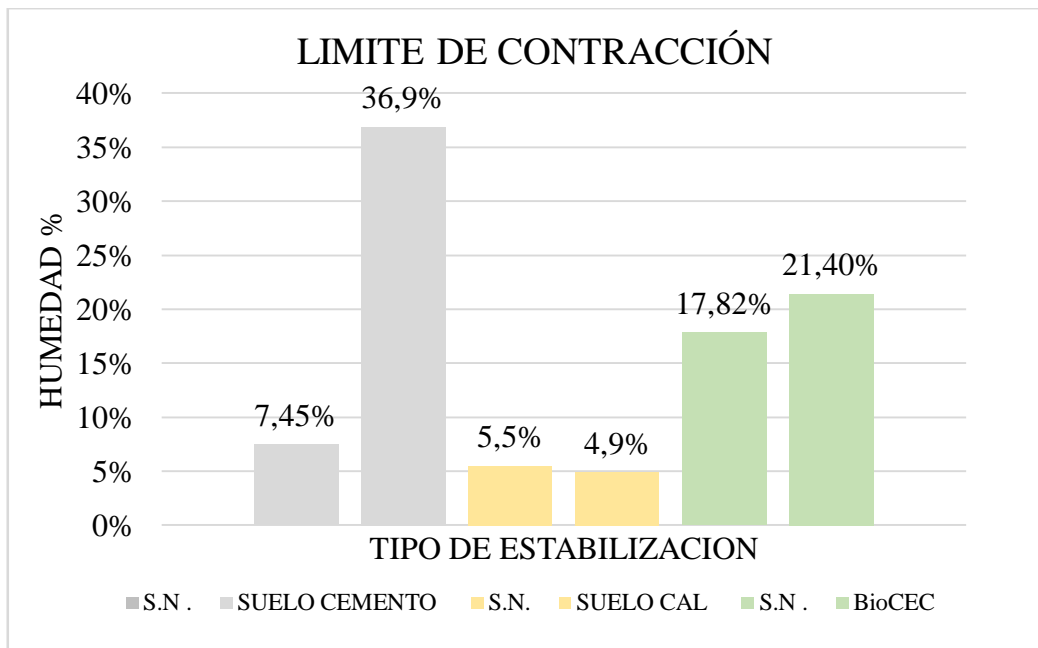


Fuente. Los autores

10.4 LIMITE DE CONTRACCION

Se muestra como el límite de contracción presenta un aumento en el suelo mejorado con cemento y BioCEC. En el método de suelo-cemento el contenido de cemento adicionado fue de 15% lo que generó un aumento significativo que pasó del 7.45 % a 36.9% en el porcentaje de humedad. es decir que a medida que el suelo natural se le adiciona cemento este necesitará mayor cantidad de agua para variar su volumen, por el contrario el en suelo modificado con cal, se observó una disminución, llevando a que su volumen varié con poco contenido de agua .

Figura 68 Comparación métodos de estabilización -límite de contracción



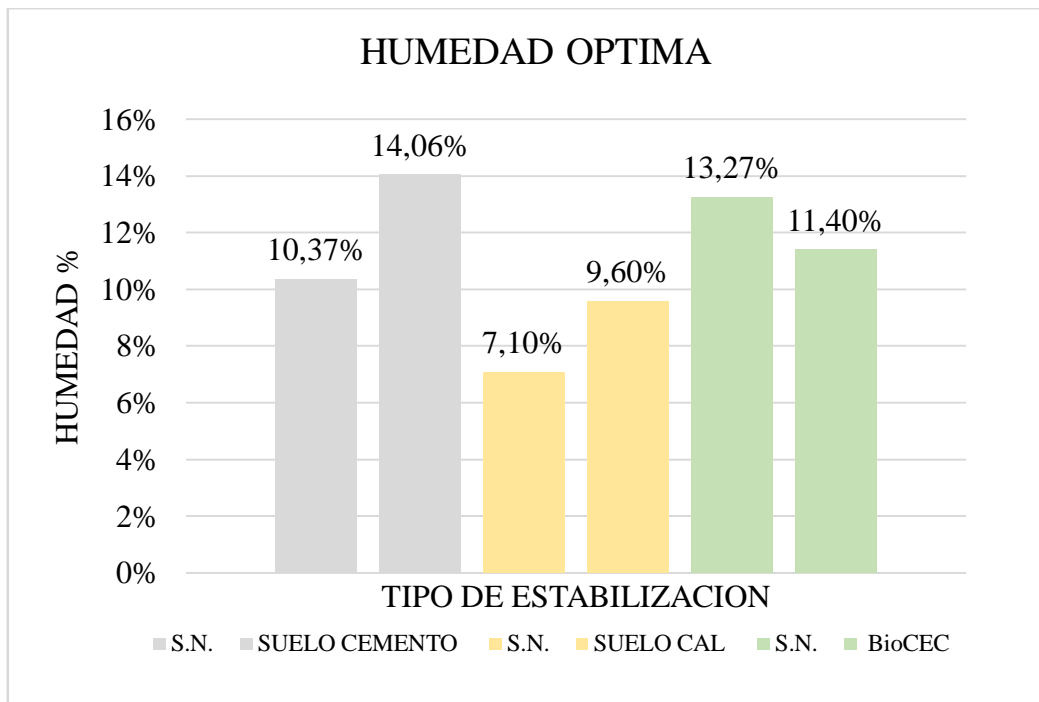
Fuente. Los autores

10.5 PROCTOR MODIFICADO

Para los métodos de suelo-cemento y suelo-cal, se presentó un incremento en el contenido de humedad, debido a que tanto el cemento como la cal, necesitan un exceso de agua para ser hidratadas de forma similar que el suelo para llegar a sus densidades máximas, esto llevo a que sus humedades optimas pasaran en el caso más representativo, el suelo-cemento, de 10.37 % a 14.06 %, esto genero una disminución de la densidad pasando de 2.250 gr/cm³ a 1.860 una disminución significativa.

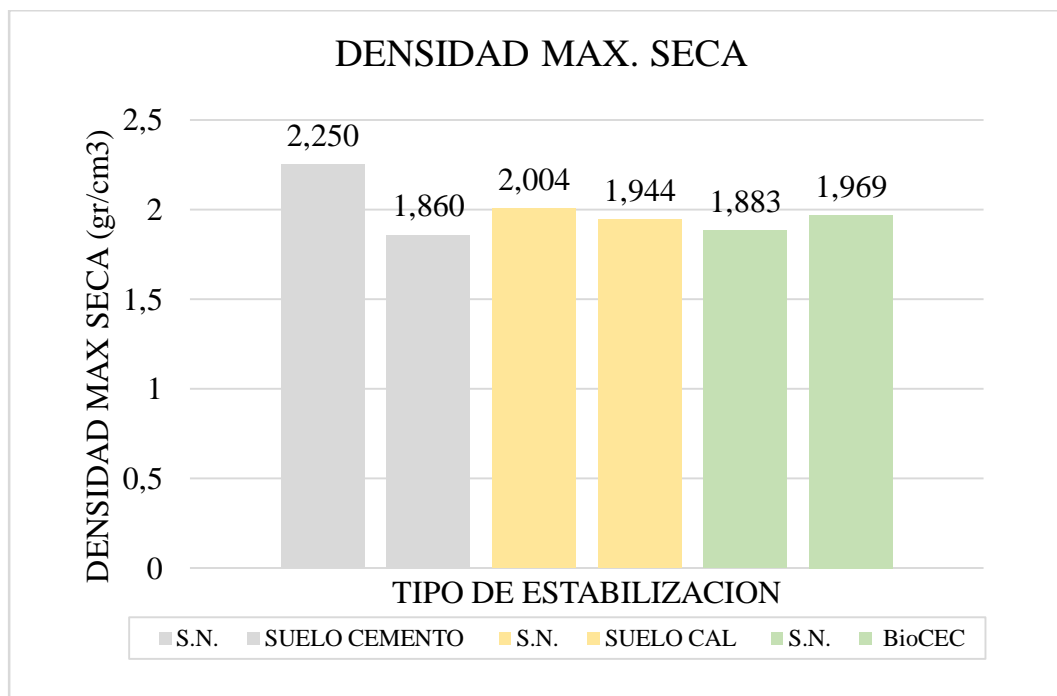
El único método que disminuyo su contenido de humedad y aumento su densidad fue el método con BioCEC, debido a sus características químicas que permiten una mejor interacción con el agua.

Figura 69 Comparación métodos de estabilización -humedad optima



Fuente. Los autores

Figura 70 Comparación métodos de estabilización -densidad máxima seca

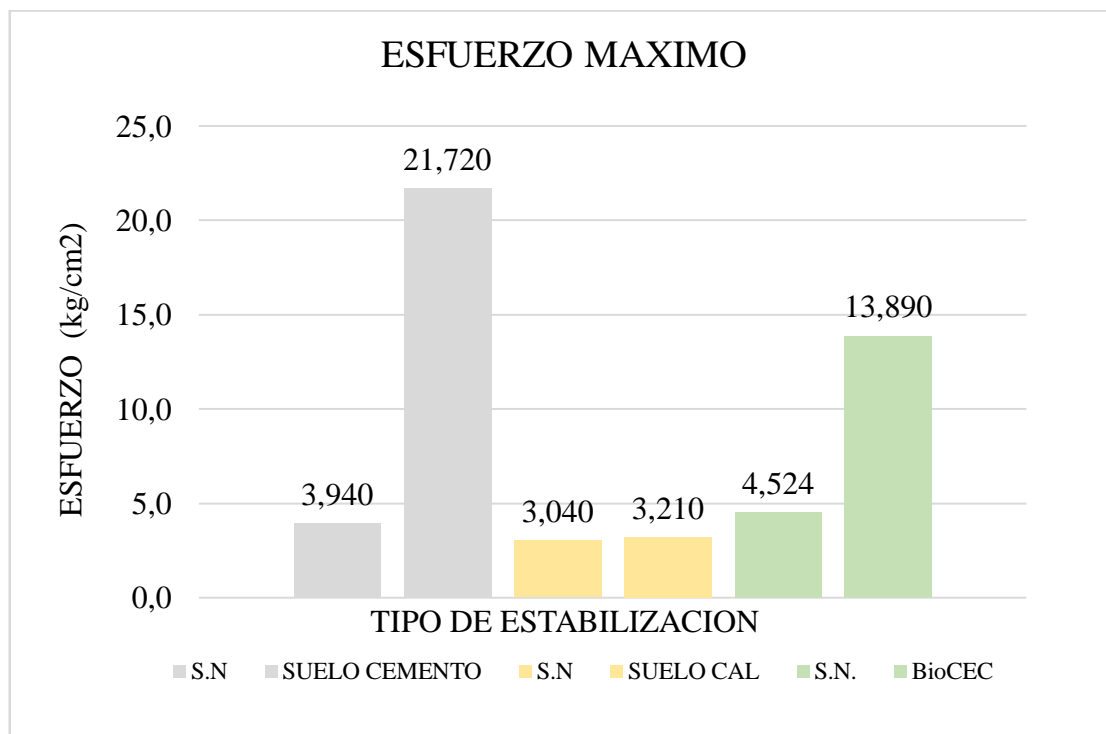


Fuente. Los autores

10.6 COMPRESION SIMPLE

La siguiente grafica nos muestra los esfuerzos máximos de los suelos estabilizados donde se ve un incremento contundente en suelo con cemento y suelo con BioCEC. Puesto que los cementos tienen como característica más importante resistir a compresión, esto se puede evidenciar en los valores obtenidos ya que elevo su esfuerzo en un 550%

Figura 71 Comparación métodos de estabilización –esfuerzo máximo

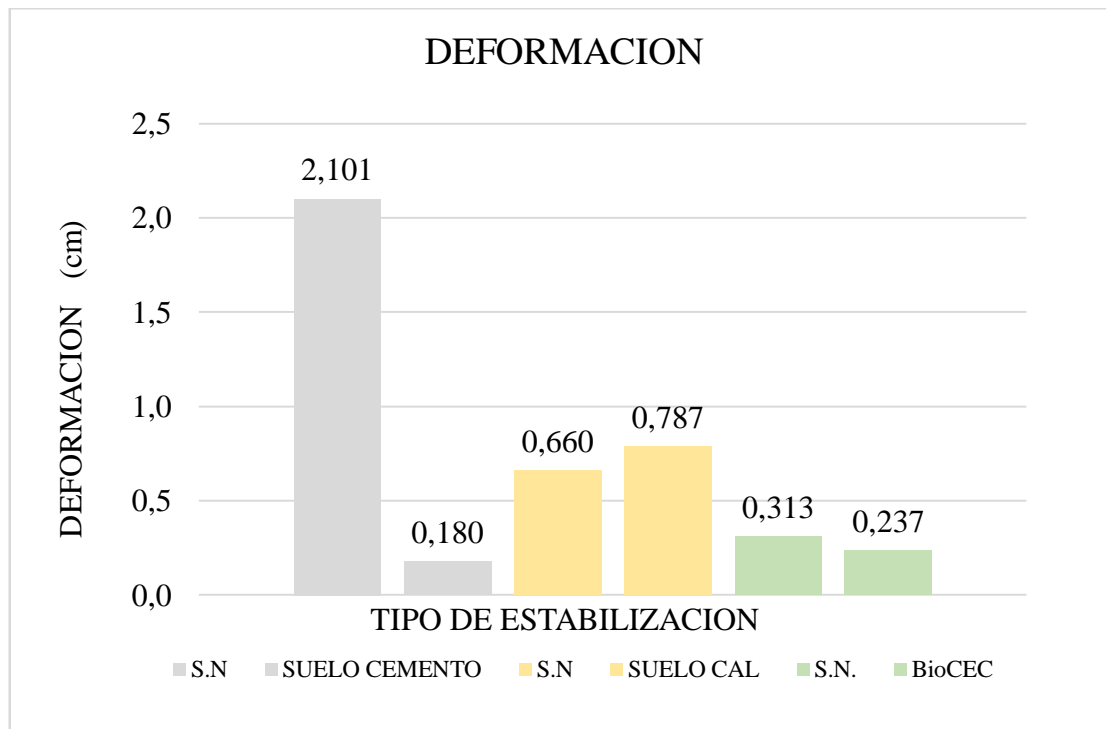


Fuente. Los autores

Se observa que el suelo-cemento presenta una deformación mínima frente a los otros métodos, cabe resaltar que el cemento posee el mayor esfuerzo de los tres métodos debido a que tiene como característica obtener excelentes valores en ensayos de compresión, además el método de suelo con adición de BioCEC presenta una disminución discreta en las deformaciones.

Cabe resaltar que la deformación del método Suelo cal, aumento debió a propiedades mecánicas de la cal.

Figura 72 Comparación métodos de estabilización -deformación

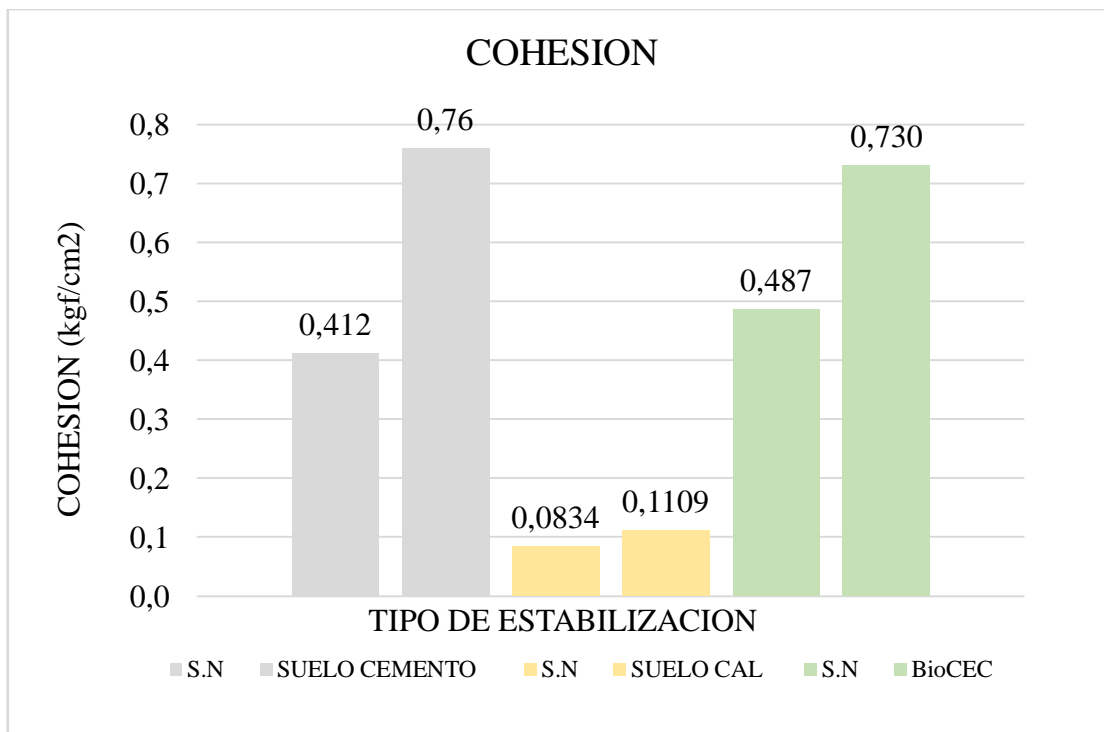


Fuente. Los autores

10.7 CORTE DIRECTO

Las siguientes graficas muestran la comparativa entre métodos de los parámetros de corte, en la gráfica de la cohesión se muestra un aumento muy leve para el suelo cal, pero un aumento significativo en el suelo cemento y suelo BioCEC.

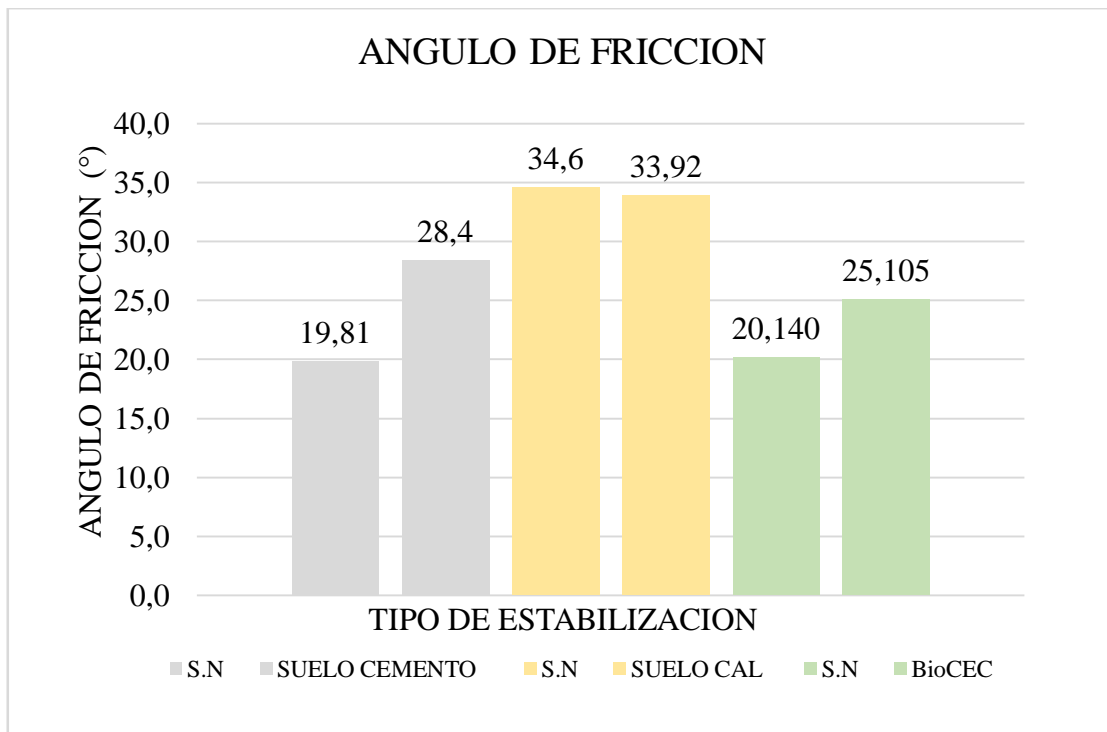
Figura 73 Comparación métodos de estabilización -cohesión



Fuente. Los autores

Se evidencia un incremento en el ángulo de fricción de los métodos suelo-cal y suelo BioCEC, es decir que un suelo mejorado por estos métodos, servirían de forma eficiente en subrasantes, en el caso de suelo cemento como sub-bases y suelos con capacidad de carga, sin embargo, el método de suelo cal, presenta una disminución en su ángulo de fricción, no siendo tan confiable para posibles usos.

Figura 74 Comparación métodos de estabilización -Angulo de fricción



Fuente. Los autores

11 COMPARACION DE LOS METODOS DE ESTABILIZACION REALIZADOS EN LA UPB Y METODO DE ESTABILIZACION CON BIOCEC

Se hizo una comparación con los tres métodos de estabilización (suelo-cemento, suelo-cal, suelo mas BioCEC), para poder diferenciar sus procesos constructivos y rentabilidad en su ejecución.

11.1 PROCESO CONSTRUCTIVO

Cuadro comparativo de los métodos constructivos a gran escala.

Tabla 88 Comparación métodos constructivos

COMPARACIÓN MÉTODOS CONSTRUCTIVOS			
ETAPA	SUELO -CAL	SUELO-CEMENTO	SUELO -BIOCEC
1	PERFILAR LA SUPERFICIE DEL CAMINO TRANSVERSAL Y LONGITUDINALMENTE	PERFILAR LA SUPERFICIE DEL CAMINO TRANSVERSAL Y LONGITUDINALMENTE	PERFILAR LA SUPERFICIE DEL CAMINO TRANSVERSAL Y LONGITUDINALMENTE
2	ESCARIFICAR A LA PROFUNDIDAD Y ANCHO ESPECIFICADOS, LUEGO PULVERIZAR PARCIALMENTE	ESCARIFICAR, PULVERIZAR Y MOJAR PREVIAMENTE EL SUELO SI FUERA NECESARIO	ESCARIFICACION: SE RECOMIENDA ESCARIFICAR MINIMAMENTE 15 CM DE PROFUNDIDAD
3	EXTENDER UNIFORMEMENTE LA CAL CON EL PORCENTAJE ESPECIFICADO DE FORMA MECANICA	CONFORMAR NUEVAMENTE EL SUELO ASÍ PREPARADO DE ACUERDO CON EL PERFIL TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL DEL CAMINO, OBTENIENDO UN ESPESOR UNIFORME DEL SUELO PULVERIZADO.	RETIRO DE MATERIAL ROCOSO Y VEGETAL (RAICES)
4	MEZCLA PRELIMINAR PARA DISTRIBUIR LA CAL DENTRO DEL SUELO Y ADICIONAR EL PORCENTAJE DE AGUA (3% ARRIBA DEL OPTIMO, ANTES DE LA COMPACTACION)	DISTRIBUCIÓN DEL CEMENTO PORTLAND SOBRE EL SUELO ANTERIORMENTE CONFORMADO	APLICACIÓN DE BIOCEC MAS AGUA PARA COMPACTACION
5	PERIODO DE FRAGUADO (1-7 DIAS)	MEZCLA E INCORPORACION DE LA HUMEDAD	HOMOGENIZACION
6	MEZCLA FINAL Y PULVERIZACION (100 % DEL MATERIAL PASE EL TAMIZ 1 PULGADA)	COMPACTACION	CONFORMACION: SE HOMOGENIZA Y SE CONFORMA LA VIA CON 4% DE PENDIENTE LATERAL
7	COMPACTACION A LA DENSIDAD REQUERIDA (95 %)	PERFILADO SUPERFICIAL Y TERMINADO	COMPACTACION
8	CURADO FINAL	CURADO (MANTENIMIENTO DE LA HUMEDAD)	CURADOS (RIEGOS DE SOLO AGUA)

Fuente. Los autores

Además, el método constructivo utilizando BioCEC tiene unas ventajas adicionales, como lo son:

- Suprime o reduce la adición de material granular. Así evita el uso de materiales de cantera y cuencas fluviales.
- Suprime botar escombros o material de la vía.
- Disminuye el arrastre de sedimento después de las lluvias.
- No afecta la salud humana, ni el medio ambiente, debido a su propiedad biodegradable.

11.2 ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Se realizó un análisis detallado de precios unitarios teniendo el m² como unidad de medida y referencia para la comparación.

➤ METODO SUELO CEMENTO

Tabla 89 Presupuesto Cemento

ACTIVIDAD:	ESTABILIZACION DE SUELOS CON CEMENTO		ITEM No. :	3,00		
			UM:	M2		
1. MATERIALES DE OBRA						
Código	Descripción	Unidad	Valor Unitario	Cantidad	%Desperdicio	Valor Parcial
	CEMENTO	KG	\$380	23,00	5%	\$9.177
	AGUA	M3	\$2.173	0,05	5%	\$114
Sub-Total						\$9.291
2. MANO DE OBRA						
Código	Trabajador	Unidad	Salario Básico	Prestaciones	Rendimiento	Valor Parcial
	OFICIAL DE OBRA CIVIL	H	\$10.200	10%	0,17	\$ 2.754,00
	AYUDANTE DE OBRA CIVIL	H	\$6.900	10%	0,17	\$ 1.863,00
Sub-Total						\$4.617
3. HERRAMIENTAS Y EQUIPO						
Código	Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Consumo	Rendimiento	Valor Parcial
	MOTONIVELADORA CON ESCARIFICADORES	H	\$97.450	0,02		\$1.949
	VIBROCOMPACTADOR	H	\$113.271	0,03		\$3.398
	CARROTANQUE	H	\$63.000	0,02		\$1.260
Sub-Total						\$6.607
OBSERVACIONES, CRITERIOS Y CONDICIONES DE ESTE ANALISIS						
<p>Algunos de los equipos aquí enumerados podrán ser reemplazados por otros que desempeñen tareas similares.</p>					Total	\$ 20.515
					IVA	19%
					COSTO DIRECTO	\$ 24.413

Fuente. Los autores

➤ METODO SUELO CAL

Tabla 90 Presupuesto Cal

ACTIVIDAD:	ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL				ITEM No. :	2,00
					UM:	M2
1. MATERIALES DE OBRA						
Código	Descripción	Unidad	Valor Unitario	Cantidad	%Desperdicio	Valor Parcial
	CAL	KG	\$450	13,00	5%	\$6.143
	AGUA	M3	\$2.173	0,05	5%	\$114
Sub-Total						\$6.257
2. MANO DE OBRA						
Código	Trabajador	Unidad	Salario Básico	Prestaciones	Rendimiento	Valor Parcial
	OFICIAL DE OBRA CIVIL	H	\$10.200	10%	0,17	\$ 2.754,00
	AYUDANTE DE OBRA CIVIL	H	\$6.900	10%	0,17	\$ 1.863,00
Sub-Total						\$4.617
3. HERRAMIENTAS Y EQUIPO						
Código	Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Consumo	Rendimiento	Valor Parcial
	MOTONIVELADORA CON ESCARIFICADORES	H	\$97.450	0,02		\$1.949
	VIBROCOMPACTADOR	H	\$113.271	0,03		\$3.398
	CARROTANQUE	H	\$63.000	0,02		\$1.260
Sub-Total						\$6.607
OBSERVACIONES, CRITERIOS Y CONDICIONES DE ESTE ANALISIS						
<p>Algunos de los equipos aquí enumerados podrán ser reemplazados por otros que desempeñen tareas similares.</p>					Total	\$17.481
					IVA	19%
					COSTO DIRECTO	\$ 20.802

Fuente. Los autores

➤ METODO BioCEC

Tabla 91 Presupuesto BioCEC

ACTIVIDAD:	ESTABILIZACION DE SUELOS CON BIOCEC				ITEM No. :	3,00						
					UM:	M2						
1. MATERIALES DE OBRA												
Código	Descripción	Unidad	Valor Unitario	Cantidad	%Desperdicio	Valor Parcial						
	BIOCEC	M2	\$3.500	1,00	5%	\$3.500						
	AGUA	M3	\$2.173	0,05	5%	\$114						
Sub-Total						\$3.789						
2. MANO DE OBRA												
Código	Trabajador	Unidad	Salario Básico	Prestaciones	Rendimiento	Valor Parcial						
	OFICIAL DE OBRA CIVIL	H	\$10.200	10%	0,10	\$ 2.040,00						
	AYUDANTE DE OBRA CIVIL	H	\$6.900	10%	0,10	\$ 1.380,00						
Sub-Total						\$3.420						
3. HERRAMIENTAS Y EQUIPO												
Código	Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Consumo	Rendimiento	Valor Parcial						
	MOTONIVELADORA CON ESCARIFICADORES	H	\$97.450	0,02		\$1.949						
	VIBROCOMPACTADOR	H	\$113.271	0,03		\$3.398						
	CARROTANQUE	H	\$63.000	0,02		\$1.260						
Sub-Total						\$6.607						
OBSERVACIONES, CRITERIOS Y CONDICIONES DE ESTE ANALISIS												
<p>Algunos de los equipos aquí enumerados podrán ser reemplazados por otros que desempeñen tareas similares.</p>						<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Total</td> <td style="text-align: center;">\$ 13.816</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">IVA</td> <td style="text-align: center;">19%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">COSTO DIRECTO</td> <td style="text-align: center;">\$ 16.441</td> </tr> </table>	Total	\$ 13.816	IVA	19%	COSTO DIRECTO	\$ 16.441
Total	\$ 13.816											
IVA	19%											
COSTO DIRECTO	\$ 16.441											

Fuente. Los autores

A continuación, presentamos los costos finales que cada método de estabilización, por metro cuadrado (m2).

Tabla 92 Costos de ejecución por m2

MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN	COSTO DE EJECUCION POR M2
BIOCEC	\$ 16.441
CAL	\$ 20.802
CEMENTO	\$ 24.413

Fuente. Los autores

12 CONCLUSIONES

- Se determinó por medio de ensayos de clasificación que el suelo natural, es una arcilla de baja plasticidad, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) un suelo tipo (CL), el cual fue el adecuado para la ejecución del proyecto.
- Se estableció mediante ensayos de laboratorio las propiedades físicas y mecánicas de un suelo CL antes y después de adicionarle estabilizante iónico (BioCEC).
- Se evaluó y determino las propiedades físicas y mecánicas del suelo adicionándole porcentajes propuestos proporcionados por el fabricante de la solución BioCEC, 5.5%, 6% y 6,6% analizando sus propiedades por medio de ensayos de compresión simple, humedad optima, ángulo de fricción, CBR's límite de contracción los cuales fueron presentando buenos resultados
- Se determinó que el porcentaje óptimo de BioCEC es el del 6.6%, ya que presentaba los valores con mejores resultados de propiedades de resistencia, baja deformación y humedades bajas.
- Al comparar los otros métodos frente al BioCEC, este presento mejorías en todos los ensayos, mientras que en los otros métodos (Suelo-Cal, Cuelo Cemento) presentaron un incremento en el contenido de humedad optima, generando una disminución en la densidad.

- Sabemos que el cemento posee una característica de resistencia a la compresión, por eso el método con mejores prestaciones de resistencia es el de Suelo-cemento, ya que, al momento de compararlo, fue el que obtuvo los mejores resultados en el ensayo de compresión simple.
- Se puede ultimar que la estabilización con BioCEC es la más económica respecto a la estabilización con cal y cemento pues hay una reducción importante en los costos de ejecución como de los materiales.

13 RECOMENDACIONES

- Para la ejecución de los ensayos es importante tener claras las indicaciones estipuladas por la norma en este caso la INVIAS 2013, puesto que el omitir algún paso puede generar un alto porcentaje de error y no resultara bien ejecutado el ensayo.
- En el caso de la estabilización iónica con BioCEC al no tener una norma, es importante seguir los pasos proporcionados por el fabricante estrictamente para el mejoramiento del suelo en el laboratorio.
- Es importante tener la herramienta y maquinaria adecuada al momento de realizar y llevar a cabo los ensayos, este es un factor de error importante, si se cuenta con la herramienta es más fácil a garantizar resultados con más exactitud.
- Siempre es recomendable realizar varios ensayos a la misma muestra para obtener un promedio y lograr valores más precisos.
- En el caso del ensayo de límites de contracción es importante tener en cuenta equipo de seguridad como gafas y guantes de látex, puesto que el mercurio presenta toxicidad.

- Al ir adicionando la solución de BioCEC al suelo es recomendable hacerlo con un aspersor puesto que al ser un suelo arcilloso se forman terrones o grumos y la concentración de BioCEC no estaría bien distribuida en el suelo.
- El químico BioCEC no presenta ningún riesgo físico y químico en particular bajo condiciones de uso normales. En caso de contacto accidental con el producto, si es en los ojos lave con agua y si es en la piel lave con abundante agua y jabón.
- Para una debida estabilización iónica, se recomienda escarificar por lo menos 15 cm de profundidad para que se introduzca bien el BioCEC en el suelo.
- Cuando no hay suficiente arcilla, se puede agregar otro suelo rico en arcilla y mezclarlo al piso original.

14 BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Barry R., R. Boudreau y C. Schawrtz, *Geotechnical Aspects of Pavements*, Minneapolis: U.S. Department of Transportation Publication No. FHWA NHI-05-037 Federal Highway Administration, 2006.
- [2] W. A. V. Areas, *ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS PLÁSTICOS CON MINERALIZADORES EN AMBIENTES SULFATADOS O YESÍFEROS*, Madrid, 2010.
- [3] M. R. Hall, R. Lindsay y M. Krayenhoff, «Pressing or Compacting the Block,» de *Modern Earth Buildings- Materials Engineering Construction and Applications*, Woodhead Publishing, 2012.
- [4] F. S. Sabogal, *Estabilización de suelos con cal*, Popayán, 1985.
- [5] PLEXUS, «PLEXUS BioCEC,» PLEXUS, 03 2018. [En línea]. Available: <https://www.plexus.com.co/wp-content/uploads/2018/03/BioCEC-Ficha-Tecnica.pdf>. [Último acceso: 03 2019].
- [6] W. Mrozik, C. Jungnickel, M. Paszkiewicz y P. Stepnowski, «INTERACTION OF NOVEL IONIC LIQUIDS WITH SOILS.,» *WATER, AIR & SOIL POLLUTION*, pp. 1-7, 2013.
- [7] M. TURKOZ, H. SAVAS y H. TOSUN, «STABILIZATION OF PROBLEMATIC CLAY SOILS WITH MAGNESIUM CHLORIDE SOLUTION,» *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, pp. 233-242, 2011.
- [8] F. M. Ortiz Salas y X. E. Núñez Huamán, *ANÁLISIS DE LA ESTABILIZACIÓN DEL MATERIAL DE CANTERA KM 02+700 DE LA RUTA CU-123 SAN JERÓNIMI MAYUBAMBA, CON LA ADICIÓN DE ESTABILIZANTE IÓNICO*, CUSCO, 2016.
- [9] A. E. Ruiz Correa, *INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE ESTABILIZANTE IÓNICO EN LA CAPACIDAD PORTANTE DE UN SUELO ARCILLOSO*, PERÚ, 2019.
- [10] M. S. Alvarez Montoya, *ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN ANTIOQUIA*, MEDELLÍN, 2015.
- [11] J. L. Quintana López, *MEJORAMIENTO DE SUELOS DEL NAICM USANDO ÓXIDO DE CALCIO*, MÉXICO, 2017.

- [12] P. E. Castillo Briceño, INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS PARA USO COMO SUBRASANTE MEJORADA DE PAVIMENTOS ENTRE LOS SECTORES CALAMARCA-HUASO, LA LIBERTAD, PERÚ, 2018.