



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**CONTROL DE LA INFILTRACIÓN EN UN REGOLITO
VOLCÁNICO CON DIFERENTES TÉCNICAS DE
SELLADO, HUASCA, HIDALGO.**

MAGDALENA FRANCISCO CATARINA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

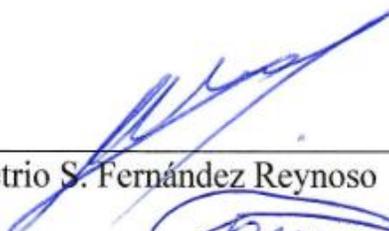
2021

La presente tesis titulada: **Control de la infiltración en un regolito volcánico con diferentes técnicas de sellado, Huasca, Hidalgo**, realizada por la alumna: **Magdalena Francisco Catarina**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



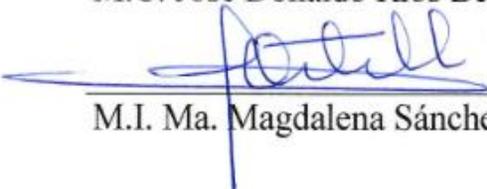
Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso

ASESOR



M.C. José Donaldo Ríos Berber

ASESOR



M.I. Ma. Magdalena Sánchez Astello

Montecillo, Texcoco, Estado de México, abril de 2021

CONTROL DE LA INFILTRACIÓN EN UN REGOLITO VOLCÁNICO CON DIFERENTES TÉCNICAS DE SELLADO, HUASCA, HIDALGO.

Magdalena Francisco Catarina, M. en C.
Colegio de postgraduados, 2018

RESUMEN

La infiltración en cuerpos de agua es un problema que se presenta en distintos lugares del mundo. Los embalses constituyen el medio de suministro de agua en muchas regiones donde el agua es escasa o su calidad no es adecuada. Almacenar agua en comunidades marginadas es difícil por las implicaciones técnicas y económicas involucradas. En la comunidad de Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo, el suelo (regolito) es producto de la intemperización de materiales volcánicos que tiene altas tasas de infiltración de agua ($13.25 \text{ mm día}^{-1}$) y hay serias dificultades para almacenar agua. El objetivo de la investigación fue evaluar, en términos de su permeabilidad y costo económico técnicas de sellado para reducir la infiltración en el área de embalse de un bordo de almacenamiento excavado en suelo residual volcánico. Se evaluaron variables físicas, químicas y mecánicas del suelo. Se aplicaron 46 tratamientos con sus respectivas repeticiones para sellar el suelo. Cuatro meses después se midió en permeámetro de carga constante el coeficiente de permeabilidad del suelo en dos etapas con diferencia de tres meses entre cada una, para comparar el efecto a través del tiempo. Los datos de permeabilidad se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA) y la comparación de medias con la diferencia mínima significativa (LSD) en el Software R para un nivel de significancia $\alpha=0.05$. En general, con los resultados de la estadística, se elaboró el análisis económico, comparando los precios unitarios contra el precio de la geomembrana mediante el costo relativo. Los resultados mostraron que los mejores tratamientos en términos económicos y control de la infiltración fueron los que incluyen dispersantes de partículas, cemento-arena y bentonita sódica.

Palabras clave: Permeabilidad, coeficiente de permeabilidad, suelos volcánicos, dispersantes partículas, gleyzación, compactación próctor.

INFILTRATION CONTROL IN A VOLCANIC REGOLITH WITH DIFFERENT SEALING TECHNIQUES, HUASCA, HIDALGO.

Magdalena Francisco Catarina, M. en C.
Colegio de postgraduados, 2018

ABSTRACT

Infiltration into bodies of water is a worldwide problem. Reservoirs are the main sources of water in many regions where water is scarce, or the water quality is poor. To store water in permeable soil is very difficult in marginated communities, due to the technical and economic implications. In Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo, the soil (regolith) is the product of volcanic materials weathering and has high rates of water infiltration ($13.25 \text{ mm día}^{-1}$) wich has serious difficulties to store water. The study aimed to evaluate, in terms of their permeability and economic cost, sealing techniques to reduce infiltration in the reservoir area of a storage excavated in residual volcanic soil. The soil's physical, chemical, and mechanical features were measured. Different treatments (46) to seal the soil were tested. Four months later, the soil permeability coefficient was measured in two stages with a three-month difference between each one, to compare the effect over time. The permeability data were subjected to an analysis of variance (ANOVA) and the comparison of means with the least significant difference (LSD) in R Software for a significance level of $\alpha = 0.05$. Overall, with the results of the statistic was develop the economic analysis, comparing unit prices against the geomembrane price through relative cost. The results showed that the best treatment in economic terms and infiltration control were those that include particles dispersants, cement-sand, and sodium bentonite.

Index words: Permeability, permeability coefficient, volcanic soils, particle dispersants, gleization, propctor compaction.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para realizar mis estudios de Postgrado.

Al Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso por confiar en mí y guiarme en la realización de esta investigación, por ser una persona muy amable y compartir sus conocimientos que me fueron muy útiles.

Al M.C. José Donald Ríos Berber por su confianza y apoyo otorgado durante la realización de la presente investigación.

A la M.I. Ma. Magdalena Sánchez Astello por su apoyo incondicional durante el transcurso de este trabajo.

Al Dr. Rogelio Carrillo González por su gran apoyo y sugerencias en la realización de la presente investigación.

Al M.C. Daniel Hernández Díaz, por el gran apoyo brindado en la realización de la fase experimental.

Al M.C. Patricio Sánchez Guzmán por su apoyo en la realización de esta investigación y al equipo del Laboratorio de Génesis.

Al equipo de Laboratorio de Física de Suelos del Postgrado de Edafología, en especial al Dr. Víctor Manuel Ordaz Chaparro, Sra. Yesenia, Sr. Óscar Ayala, Sr. Cornelio, Sra. Silvia y Sr. Melquidisec, por todo el apoyo incondicional otorgado durante la realización de la fase de laboratorio.

Al equipo de Laboratorio de Química de suelos del postgrado de Edafología, en especial al M.C. Eulises Corona y Don Juanito por el apoyo otorgado en la fase de Laboratorio.

A Don Fernando, trabajador del Laboratorio de Mecánica de suelos del Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, por el apoyo incondicional en la realización de la fase de Laboratorio.

A Mariela por el apoyo otorgado en los trámites administrativos durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados y por preocuparse por sus estudiantes.

A Don Cruz, Paty, Cristina Bonilla y Lulú Ávila del Postgrado de Hidrociencias por el gran apoyo brindado.

A la Sra. Alicia, porque durante mi estancia en España, fue la persona que más influyó en mí para lograr este trabajo. Gracias por sus palabras y consejos.

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de estar aquí y poder lograr este objetivo.

A mi hija Dafne, por ser la niña más inteligente y comprensiva, por estar conmigo en los días de trabajo, en los desvelos, en días tristes y felices transcurridos durante este periodo.

A mi esposo Daniel, por estar conmigo en todo momento apoyándome incondicionalmente.

A mi madre, por ser la persona que me dio la vida y el ser que más admiro por su fuerza y valentía.

A mi hermano Aurelio Demetrio por compartir conmigo sus conocimientos y poder contar con él en cualquier momento.

A mis herman@s (Aure, Aurelio, Julián, Natividad, Diana, Fernanda, Maricela, Eunice y Jazmín por pertenecer a la familia Francis y compartir con ustedes los más bellos momentos. Son increíbles.

A mis sobrinit@s que los adoro mucho.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. OBJETIVOS	3
4. HIPÓTESIS	4
5. REVISIÓN DE LITERATURA	5
5.1. Suelos derivados de cenizas volcánicas	5
5.1.1. Localización	5
5.1.2. Clasificación, origen y formación	6
5.1.2.1. Clasificación	6
5.1.2.2. Material de origen	6
5.1.2.3. Ambiente de depósito	7
5.1.2.4. Procesos post-depósito	7
5.1.2.5. Formación y transformación de componentes coloidales	8
5.1.2.6. Relaciones de estabilidad mineral	10
5.1.3. Composición mineralógica de suelos derivados de cenizas volcánicas	10
5.1.4. Propiedades de los suelos volcánicos	14
5.2. Propiedades físicas, químicas y mecánicas de los suelos	16
5.2.1. Plasticidad	16
5.2.1.1. Límites de Atterberg	16
5.2.2. Ensayo granulométrico	17
5.2.3. Clasificación SUCS	17
5.2.4. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	18
5.2.5. Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)	19
5.2.6. Análisis elemental de arcilla	19

5.2.7.	Determinación de alófana	19
5.2.8.	Compactación del suelo	20
5.2.9.	Ensayo de compactación de suelos. próctor estándar.	21
5.3.	Estabilización de suelos	22
5.3.1.	Tipos de estabilización de suelos	22
5.4.	Infiltración del agua en el suelo	24
5.4.1.	Coeficiente de permeabilidad del suelo	25
5.4.2.	Valores de referencia del coeficiente de permeabilidad	27
5.4.3.	Métodos de control de infiltración en el suelo	28
5.4.3.1.	Sellado biológico (Gleyzación).....	29
5.4.3.2.	Sellado con dispersantes de partículas	31
5.4.3.3.	Sellado con Bentonita	33
5.4.3.4.	Sellado con suelo-cemento	34
5.4.3.5.	Sellado con suelo-cal	34
6.	METODOLOGÍA	37
6.1.	Descripción del área de estudio	37
6.1.1.	Localización	37
6.1.2.	Clima.....	38
6.1.3.	Suelos	38
6.1.4.	Geología.....	38
6.1.5.	Evaporación en el sitio de estudio	39
6.2.	Muestreo de suelo	39
6.3.	Materiales y métodos	39
6.3.1.	Determinación de las propiedades físico-químicas y mecánicas del suelo.....	41
6.3.1.1.	Ensayo granulométrico	41
6.3.1.2.	Textura	42
6.3.1.3.	Ensayo límites de Atterberg.....	43
6.3.1.4.	Materia orgánica	44
6.3.1.5.	Determinación de alófana	45
6.3.1.6.	pH.....	45
6.3.1.7.	Conductividad eléctrica	45

6.3.1.8.	Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	46
6.3.1.9.	Porcentaje de sodio intercambiable (PSI).....	48
6.3.1.10.	Bases intercambiables (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ y Na ⁺).....	48
6.3.1.11.	Identificación de arcillas (Difracción de rayos X).....	49
6.3.1.12.	Estimación de la proporción suelo-cal usando el método del pH.....	52
6.3.1.13.	Ensayo de compactación próctor estándar.....	52
6.3.2.	Dosis de tratamientos.....	53
6.3.2.1.	Gleyzación.....	53
6.3.2.2.	Aplicación de dispersantes.....	54
6.3.2.3.	Suelo-bentonita.....	58
6.3.2.4.	Suelo-Cemento.....	58
6.3.2.5.	Suelo-Cal.....	58
6.3.2.6.	Estimación de la proporción suelo-cal usando el método del pH.....	59
6.3.2.7.	Compactación próctor estándar.....	60
6.3.2.8.	Muestra inalterada (testigo).....	60
6.3.3.	Resumen de la dosis de tratamientos.....	60
6.4.	Determinación del coeficiente de permeabilidad.....	61
6.4.1.	Preparación de la muestra.....	62
6.4.2.	Montaje de la muestra.....	62
6.4.3.	Evaluación del coeficiente de permeabilidad.....	63
6.5.	Análisis estadístico.....	64
6.5.1.	Análisis de varianza(ANDEVA).....	65
6.5.2.	Comparación de medias.....	66
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
7.1.	Propiedades físicas y químicas del suelo.....	67
7.1.1.	Clase textural del suelo.....	68
7.1.2.	Granulometría.....	69
7.1.3.	Clasificación SUCS.....	70
7.1.4.	Identificación de la arcilla (difracción de rayos X).....	71
7.2.	Propiedades mecánicas del suelo.....	73
7.2.1.	Prueba de compactación próctor estándar.....	73

7.3.	Resultados de evaporación e infiltración en el sitio de estudio	73
7.4.	Resultados de las pruebas de permeabilidad de los tratamientos	73
7.4.1.	Gleyzación	75
7.4.2.	Carbonato de sodio	76
7.4.3.	Tripolifosfato de sodio.....	76
7.4.4.	Fosfato de sodio	77
7.4.5.	Silicato de sodio.....	77
7.4.6.	Cloruro de sodio.....	79
7.4.7.	Hidróxido de sodio.....	79
7.4.8.	Bentonita sódica.....	80
7.4.9.	Cemento-arena	81
7.4.10.	Cal hidratada	82
7.4.11.	Compactación próctor estándar.....	83
7.4.12.	Muestra inalterada (testigo)	84
7.5.	Comparación de valores mínimos, máximos y promedios de la permeabilidad	84
7.6.	Comparación de tratamientos	85
7.7.	Análisis económico.....	89
8.	CONCLUSIONES	92
9.	RECOMENDACIONES.....	93
10.	REFERENCIAS.....	94
	ANEXOS	101

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de estabilización.	22
Cuadro 2. Comparación de técnicas de estabilización del suelo.	24
Cuadro 3. Coeficiente de permeabilidad para suelos de obras de ingeniería civil.	27
Cuadro 4. Dosis de aplicación para el método de sellado Gleyzación.	54
Cuadro 5. Resultados de la CIC y sodio en el suelo.	56
Cuadro 6. Cantidad de dispersante por cada kilogramo de suelo.	56
Cuadro 7. Dosis de dispersantes de partículas por cada kilogramo de suelo.	57
Cuadro 8. Cantidad de bentonita sódica.	58
Cuadro 9. Dosis de cemento-arena por cada kilogramo de suelo.	58
Cuadro 10. Dosis de cal para la estabilización del suelo.	59
Cuadro 11. Suelo utilizado para el tratamiento compactación próctor estándar.	60
Cuadro 12. Resumen de los tratamientos evaluados.	61
Cuadro 13 Características físicas, químicas y mecánicas del suelo.	68
Cuadro 14. Pérdidas de agua por infiltración y evaporación en el sitio de estudio.	73
Cuadro 15. Coeficiente de permeabilidad por cada tratamiento	74
Cuadro 16. Comparación de valores máximos, mínimos y promedios del coeficiente de permeabilidad.	85
Cuadro 17. Grupos de comparación de medias obtenido del software R.	86
Cuadro 18. Análisis económico de los tratamientos.	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Formación y transformación de minerales arcillosos y sus complejos orgánicos en suelos derivados de cenizas volcánicas en zonas climáticas templadas. Fuente: Dahlgren <i>et al.</i> (1993).....	9
Figura 2. Diagrama de estabilidad que representa las relaciones de estabilidad mineral de minerales comunes encontrados en suelos de cenizas volcánicas a 25 ° C. Fuente: Dahlgren <i>et al.</i> (1993).....	10
Figura 3. Esquema estructural de minerales del suelo a base de láminas octaédricas y tetraédricas. Fuente: Schulze (2002); Weil y Brady (2017).....	12
Figura 4. a. Modelo poliédrico de birnesita con iones intercalares divalentes más cercanos a las hojas octaédricas de Mn-O arriba y abajo, mientras que en (b) los iones monovalentes (Na) están en el centro de la intercepta. En todorokita (c), los cuatro círculos en el túnel central representan moléculas de agua alrededor del catión del túnel y en (d) esquema estructural de gibbsita. Fuente: Schulze (2002).	14
Figura 5. Diagrama de clasificación SUCS.....	18
Figura 6. Comportamiento típico de compactación de arcilla alofánica. Fuente: Wesley (2003).	20
Figura 7. Variación de la permeabilidad del suelo en función del tiempo de humectación constante. Fuente: Jordán (2006).	25
Figura 8. Esquema del dispositivo experimental de Darcy. Fuente: Jordán (2006).	26
Figura 9. Relación entre el tipo de suelo con el coeficiente de permeabilidad, drenaje y relleno sanitario. Fuente: Jaramillo (2002).	28
Figura 10. Sección tratada con cal del canal Friant-Kern (tomada en noviembre de 2010) en la parte izquierda; la parte derecha consiste en una pendiente original no tratada cubierta de grava.Fuente: Herrier <i>et al.</i> , (2013).....	36
Figura 11. Localización del área de estudio.	37
Figura 12. Juego de tamices para ensayo granulométrico.	41
Figura 13. a) peso del suelo retenido; b) suelo retenido en malla.	42
Figura 14. Determinación de textura método de Bouyoucos modificado.....	42
Figura 15. a) Determinación del límite líquido; b) Determinación del límite plástico.	44
Figura 16. Medición del pH.	45
Figura 17. a) Filtrado para determinación de bases intercambiables; b) Prueba de cloruros.....	46
Figura 18. Aparato de destilación para determinar CIC.	47
Figura 19. Titulación con ácido sulfúrico para determinar CIC.....	47
Figura 20. Determinación de sodio y potasio por flamometría.	49
Figura 21. a) y b) Eliminación de materia orgánica en la campana de extracción; c) Prueba de carbonatos.....	50

Figura 22. Eliminación de óxidos de hierro.	50
Figura 23. a) muestra final de la separación de arcilla; b) montaje en húmedo de la arcilla.	51
Figura 24. Equipo de difracción de rayos X.	51
Figura 25. a) Preparación de especímenes con diferentes porcentajes de cal; b) Medición de pH.	52
Figura 26. Prueba de compactación próctor estándar.	53
Figura 27. Esquema del tratamiento del método de sellado Gleyzación. Fuente: Nicholaichuk (1978).	54
Figura 28. Esquema de los tratamientos con dispersantes.	55
Figura 29. Variación del pH con respecto a las diferentes mezclas de suelo-cal.	59
Figura 30. Hidratación de muestras.	62
Figura 31. Montaje de muestras al permeámetro de carga constante	63
Figura 32. Permeámetro de carga constante.	64
Figura 33. Clase textural del suelo utilizado.	69
Figura 34. Curva granulométrica del suelo por tamizado.	69
Figura 35 Clasificación de la arcilla en la Carta de Plasticidad de Casagrande.	70
Figura 36. Análisis elemental de arcilla en el difractor de rayos X.	72
Figura 37. Coeficiente de permeabilidad (k) en gleyzación.	75
Figura 38. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con carbonato de sodio.	76
Figura 39. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con tripolifosfato de sodio.	77
Figura 40. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con fosfato de sodio.	78
Figura 41. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con silicato de sodio.	78
Figura 42. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con cloruro de sodio.	79
Figura 43. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con hidróxido de sodio.	80
Figura 44. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con bentonita sódica.	81
Figura 45. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con cemento-arena.	82
Figura 46. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con cal hidratada.	83
Figura 47. Coeficiente de permeabilidad del tratamiento prueba próctor.	84
Figura 48. Coeficiente de permeabilidad promedio en tratamientos.	88
Figura 49. Comparación entre el coeficiente de permeabilidad y el análisis económico de los tratamientos efectivos.	91

1. INTRODUCCIÓN

Las pérdidas de agua por infiltración en embalses es un problema que se presenta en distintos lugares del mundo. Los embalses constituyen el medio para captar, almacenar y abastecer de agua en muchas regiones donde la calidad del agua no es adecuada o no está disponible para su aprovechamiento. Sin embargo, en algunos sitios hay una excesiva filtración de estos reservorios (Nicholaichuk, 1978).

En la comunidad de Santo Domingo, Huasca de Ocampo, el suelo predominante donde se excavan los almacenamientos, principalmente para abrevadero, corresponde a regolitos producto de la intemperización de materiales volcánicos los cuales presentan altas tasas de infiltración de agua, entre 1.49 y 17.02 mm día⁻¹ (Lenz, 2016). Este tipo de obra, requiere de una inversión inicial costosa y su sellado a través de polímeros o concreto eleva de manera significativa el costo del agua.

Existen métodos eficaces para reducir el problema de la infiltración como las geomembranas, pero, resultan ser muy costosas. Aun así, su uso se ha incrementado en las áreas rurales para el control de la infiltración del agua en el suelo. Payán *et al.* (2017) afirman que el precio de la geomembrana es elevado y comparada con la mezcla del suelo cemento, ésta requiere de un tratamiento especializado, además de personal capacitado para su instalación.

Como una alternativa a la geomembrana o el concreto se tienen los métodos de sellado como la compactación, la gleyzación, los dispersantes de partículas, el cemento-arena, la cal-arcilla y la bentonita sódica. La ventaja de estos métodos alternativos de sellado es una mayor vida útil y no requieren de personal calificado para su instalación.

El objetivo de la investigación fue evaluar las diferentes técnicas de sellado para el control de la infiltración en un suelo residual producto del intemperismo químico de tobas volcánicas.

2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación está enfocada en el estudio del coeficiente de permeabilidad de un suelo residual de origen volcánico, a través de la aplicación de diferentes técnicas de sellado como: compactación, gleyzación, dispersantes de partículas, adición de cal, cemento y bentonita que permitirán estabilizar el suelo y disminuir la infiltración del agua.

Al estudiar las características físicas del suelo del área de estudio, se obtuvo un coeficiente de permeabilidad de $16.46 \text{ mm dia}^{-1}$, valor considerado alto para obras de ingeniería civil y/o rellenos sanitarios (Crespo, 2004; Jaramillo 2006; USDA, 2012; FAO, 2020)), que no son revestidos por algún material geosintético, en los que, sólo se realiza la excavación y/o terraplén y se compactan sin agregar ningún material que permita sellar el fondo de los mismos para evitar pérdidas significativas de agua por infiltración.

Cabe recalcar que, estos pequeños bordos son el único medio de suministro de agua en tiempos de sequía; el agua almacenada es utilizada para el desarrollo de cultivos y abrevadero, permitiendo mejorar la producción. Sin embargo, la construcción de los mismos requiere de una inversión inicial costosa, elevando el costo del agua.

La finalidad de esta investigación es buscar alternativas de solución que disminuyan la infiltración, a través de materiales orgánicos y químicos, y permitan estabilizar y sellar el fondo de los pequeños bordos de almacenamiento. Se pretende la utilización de estos materiales porque resultan ser más económicos que la geomembrana; la cual es muy eficaz en la impermeabilización de embalses, sin embargo, su costo es elevado y de duración limitada.

3. OBJETIVOS

Objetivo general

- Identificar la mejor técnica de sellado para un suelo volcánico residual en términos de su permeabilidad y costo económico.

Objetivos específicos

- Determinar las cantidades óptimas y eficientes de productos usados en los procedimientos técnicos de sellado de lechos de embalses de acuerdo a las características, físicas, químicas y mecánicas del suelo.
- Determinar los coeficientes de permeabilidad de los diversos tratamientos de sellado en estudio.
- Determinar los mejores tratamientos de sellado de lecho de embalses, técnica y económicamente.

4. HIPÓTESIS

- Las técnicas de sellado reducen el coeficiente de permeabilidad del suelo a valores mínimos aceptados para embalses artificiales.
- Las técnicas y los materiales de sellado son más económicas y de fácil acceso, que la geomembrana y los procedimientos de aplicación son fáciles y simples de realizar.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1.Suelos derivados de cenizas volcánicas

Los suelos derivados de cenizas volcánicas se forman generalmente sobre cenizas de origen volcánico depositadas en tiempos geológicos recientes ubicados cerca de fuentes de volcanes donde se ha depositado una capa de ceniza lo suficientemente gruesa durante las erupciones. El principal proceso de formación del suelo es la rápida meteorización de la ceniza volcánica para producir minerales de silicato amorfos o poco cristalizados como el alofano, imogolita y el oxihidróxido de hierro (Weil y Brady, 2017).

5.1.1. Localización

Los suelos derivados de materiales volcánicos se localizan en las regiones de volcanes activos y recientemente extintos; cubren aproximadamente 124 millones de hectáreas (0.84%) de la superficie terrestre del planeta y sólo 60% se concentra en países tropicales (Leamy, 1984; Shoji *et al.*, 1993; Dahlgren *et al.*, 2004).

Si bien los suelos de cenizas volcánicas comprenden una extensión relativamente pequeña de la superficie del planeta, su importancia radica en ser un recurso terrestre para la población humana que viven en esas regiones (Shoji *et al.*, 1993). Las regiones donde se ubican estos suelos comprenden continentes como: Europa, África, Asia y América. En el continente americano se pueden encontrar en sitios como: Alaska, British Columbia, Washington, Oregón, California, México, Costa Rica, Panamá, Honduras, Guatemala, El Salvador, Nicaragua, West Indies, Ecuador, Colombia, Perú, Chile, Argentina y Bolivia (Leamy, 1984).

En México estos suelos se pueden encontrar sobre el Eje Neovolcánico, que cruza el centro del país desde la costa del Pacífico hasta el golfo de México, abarcando los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Colima, Nayarit y Ciudad de México (Yarza, 2003).

El Eje Neovolcánico, es el arco volcánico neógeno más grande en Norteamérica, está construido sobre provincias magmáticas del Cretáceo y Cenozoico. Abarca 160,000 km² y una longitud de casi 1000 km entre 18 ° 30 'y 21 ° 30' N en el centro de México (Ferrari *et al.*, 2012). Los aparatos

volcánicos predominantes son: estratovolcanes y conos de cenizas o volcanes cineríticos, además de una buena cantidad de calderas volcánicas rellenas de coladas magmáticas y materiales piroclastos (Medina, 2000).

El área de estudio se ubica en el estado de Hidalgo, dentro de la provincia del Eje Neovolcánico en la subprovincia de Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (INEGI, 2009).

5.1.2. Clasificación, origen y formación

Enseguida, se muestra la clasificación, el material de origen, el ambiente de depósito, los procesos post depósito y la formación y transformación de componentes coloidales.

5.1.2.1. Clasificación

Takahashi y Shoji (2002) indican que los suelos derivados de cenizas volcánicas fueron identificados por primera vez, en un sistema internacional de clasificación de suelos, en el año de 1960. Éstos, son clasificados como “Andosoles” en el World Reference Base for Soil Resources (WRB Classification) y “Andisoles” en la taxonomía de suelos de Estados Unidos de América.

5.1.2.2. Material de origen

Büttner *et al.* (1999) afirman que las cenizas volcánicas son resultado de la fragmentación del magma solidificado y de materiales de las paredes del cráter que fueron formados durante erupciones anteriores. Los mecanismos que llevan a producir cenizas volcánicas son de tres tipos. El primero consiste en la ruptura del magma solidificado debido a la vesiculación. La vesiculación ocurre debido a que las burbujas de aire presentes en el magma se expanden rápidamente, explotan y fracturan el magma. El segundo mecanismo consiste en la fragmentación del magma solidificado debido a los elevados esfuerzos térmicos y acústicos que se producen cuando el magma interactúa con agua. El último mecanismo ocurre por la pulverización de la lava preexistente en las paredes de la chimenea del volcán durante la erupción.

5.1.2.3. Ambiente de depósito

El depósito de las cenizas es controlado por propiedades físicas y químicas de los elementos que forman la nube de piroclastos. Las propiedades de mayor influencia son la forma, esfericidad, rugosidad, superficie específica, composición química y carga electrostática (Riley *et al.*, 2003).

La morfología y textura también influyen en la deposición de las cenizas volcánicas debido a los efectos de transporte; si bien, inicialmente la mayoría de las cenizas tiene una morfología en bloque o vesicular a medida que la nube de piroclastos se mueve, la fricción y abrasión entre las cenizas tiende a reducir la rugosidad, la superficie específica y a incrementar la esfericidad (Riley *et al.*, 2003).

Los fluidos presentes durante la erupción volcánica y durante el movimiento de la nube de piroclastos influyen directamente en las propiedades superficiales de las cenizas dando como resultado cenizas secas o húmedas que forman sedimentos con diferentes características. Las cenizas secas forman espesores variando entre decímetros y metros, formados por lapilli (diámetro=2-38 mm) y cenizas gruesas. Por el contrario, las cenizas húmedas forman sedimentos delgados, con estructuras pobremente organizadas y espesores del orden de centímetros (Büttner *et al.*, 1999).

Durante el movimiento de la nube de piroclastos, los fragmentos con diámetro inferior a 20 μm , se adhieren unos con otros o a la superficie de partículas de mayor tamaño. En esta agregación existen fuerzas electrostáticas generadas durante la erupción (i.e. producidas durante el contacto de agua con lava caliente) y es afectada por la presencia de fluidos como el ácido sulfúrico (Gilbert *et al.*, 1991). A esta agregación producida antes del depósito, se le atribuye la amplia variación de la distribución de tamaños de partículas encontrados en depósitos derivados de cenizas volcánicas que algunas veces son partículas muy finas encontradas en zonas cercanas a los volcanes y que han sido depositadas en forma de agregaciones.

5.1.2.4. Procesos post-depósito

La formación de suelos derivados de cenizas volcánicas incluye procesos claves que llevan a la transformación de cenizas volcánicas en depósitos de suelo. En esta transformación tal vez, el

proceso más importante consiste en la síntesis de minerales secundarios a partir de los minerales primarios presentes en las cenizas volcánicas originarias. El tiempo y el clima son los factores que más afectan la síntesis de minerales secundarios, debida principalmente a procesos químicos.

El clima actúa en la meteorización de las cenizas desde el depósito, a través de precipitación, temperatura, humedad y vientos. La influencia del tiempo es particularmente observada en la distribución de tamaños de las partículas. Mientras que suelos muy antiguos y altamente meteorizados son finos y arcillosos, suelos con corta edad y ligeramente meteorizados son limosos y arenosos.

De acuerdo a la clasificación presentada anteriormente, los suelos volcánicos andisoles, normalmente, se forman muy rápido en climas húmedos y cambian a otros órdenes de suelos a medida que aumenta la edad del suelo y el grado de meteorización; en condiciones cálidas y secas se promueve la formación de silicatos de capa cristalina en lugar de materiales no cristalinos, la lixiviación es limitada, hay alta saturación de bases, éstos suelos son los vertisoles, que también pueden formarse en regiones cálidas que tienen una estación seca distinta ya que la ceniza se meteoriza en esmectita y vermiculita (Ugolini y Dalhgren, 2002).

Según Gisbert, *et al.*, (2020) la génesis de los vertisoles está relacionada con el elevado contenido de arcilla (mayor del 30%), minerales arcillosos del tipo 2:1 (arcillas expandibles) y cambios de humedad por la alternancia de periodos lluviosos y secos. El factor formador que más influye es el clima; por la combinación de temperatura y precipitación se producen periodos de desecación-humedecimiento que definen a los vertisoles, ubicados en cualquier lugar del planeta. En lo que respecta al tiempo, éstos se forman sobre suelos jóvenes, pero con material parental que proviene de superficies geomorfológicas antiguas.

5.1.2.5. Formación y transformación de componentes coloidales

Los suelos derivados de cenizas volcánicas generalmente tienen su fracción coloidal dominada por uno de varios componentes: (1) complejos de Al-humus con o sin minerales de silicato de capa 2:1 y / o minerales 2:1 intercalados con hidroxil-Al, (2) halloysita, o (3) alofano / imogolita. La halloysita se encuentra como el mineral de arcilla dominante en ambientes ricos en sílice (Si), mientras que el alofano y la imogolita ricos en aluminio (Al) se encuentran en concentraciones de

Silicio relativamente más bajas. Además de estos componentes mal ordenados, la caolinita, la gibbsita y varios silicatos de capa 2: 1 en capas intercaladas 2: 1 o hidrox-Al (silicatos de capa 2: 1 cloritizados) se encuentran comúnmente en suelos derivados de materiales volcánicos (Dahlgren *et al.*, 1993).

Se han propuesto varias secuencias de formación / transformación para explicar la aparición de estos conjuntos coloidales distintos tal como lo muestra la Figura 1. Si bien estas secuencias de transformación consideran el tiempo o el clima como la variable maestra que controla las propiedades mineralógicas, estas variables maestras se traducen literalmente en factores que regulan las actividades de solución del suelo o la disponibilidad de Si y Al. Por ejemplo, durante las primeras etapas de la meteorización por cenizas volcánicas, las actividades de Si soluble se mantienen a niveles más altos que durante las etapas avanzadas de meteorización debido al abundante suministro de materiales altamente resistentes a la intemperie, como el vidrio volcánico (Dahlgren *et al.*, 1993).

A medida que avanza la meteorización, las concentraciones de materiales altamente resistentes a la intemperie se agotan y las actividades de solución de suelo de Si disminuyen. La cantidad de lluvia también es un factor importante que controla las actividades de Si soluble a través de su regulación de los procesos de lixiviación (Dahlgren *et al.*, 1993).

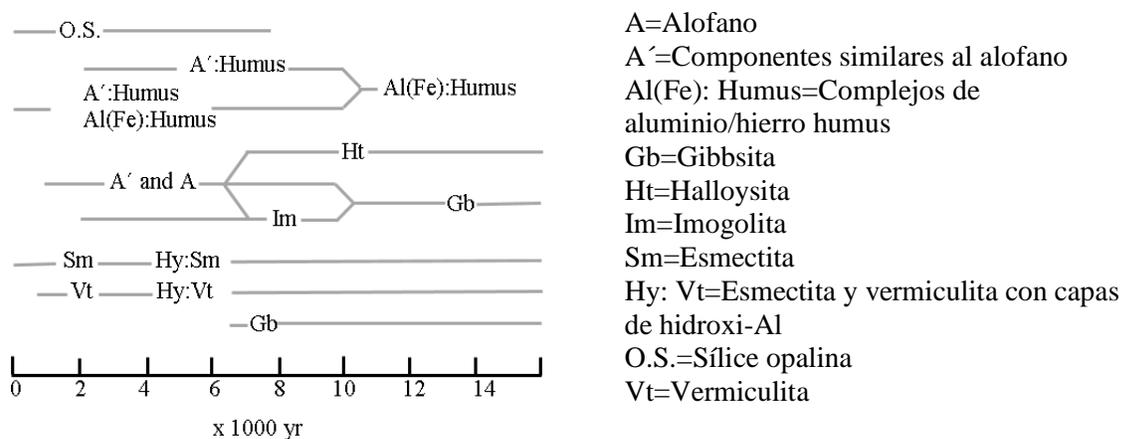


Figura 1. Formación y transformación de minerales arcillosos y sus complejos orgánicos en suelos derivados de cenizas volcánicas en zonas climáticas templadas. Fuente: Dahlgren *et al.* (1993).

5.1.2.6. Relaciones de estabilidad mineral

La Figura 2, representa la relación entre las actividades acuosas y los componentes minerales en fase sólida, en otras palabras, la solubilidad de los minerales de aluminosilicatos encontrados en suelos de origen volcánico. El eje vertical representa el pH menos un tercio del potencial de Al^{3+} , el horizontal las actividades de H_4SiO_4 (ácido silícico). El orden de estabilidad en estas actividades es: esmectita > caolinita > halloysita > imogolita > gibbsita, la caolinita por su parte reemplaza a la esmectita como la fase mineral estable, y la imogolita y la gibbsita se vuelven más estables que la halloysita (Dahlgren *et al.*, 1993).

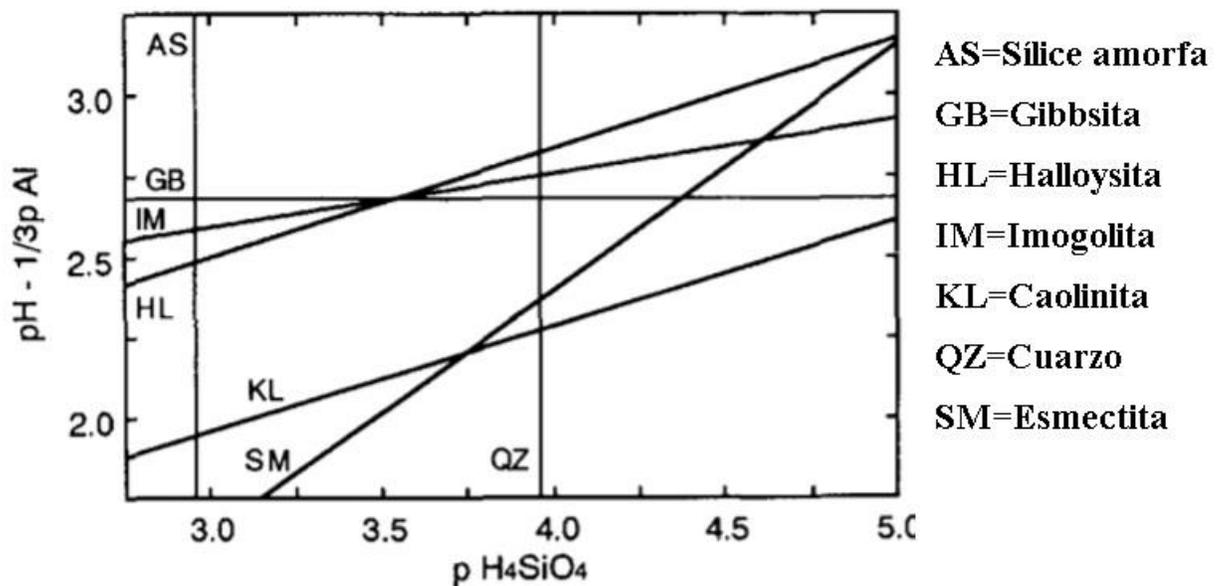


Figura 2. Diagrama de estabilidad que representa las relaciones de estabilidad mineral de minerales comunes encontrados en suelos de cenizas volcánicas a 25 ° C. Fuente: Dahlgren *et al.* (1993).

5.1.3. Composición mineralógica de suelos derivados de cenizas volcánicas

La composición mineralógica de los suelos volcánicos, es caracterizada por la presencia de minerales de arcilla desarrollados a partir de la meteorización del vidrio volcánico y de otros minerales primarios como feldspatos, anfíbola y piroxenos. El vidrio volcánico es uno de los principales constituyentes, es termodinámicamente inestable y es el primero en meteorizarse, su presencia favorece la formación de minerales denominados amorfos ó “no cristalinos” (i.e. alófana, óxidos de aluminio y complejos órgano-inorgánicos) debido a que durante su meteorización

liberan algunos elementos químicos con mayor rapidez a la necesaria para formar minerales cristalinos como la caolinita y haloisita (Shoji *et al.*, 1993; Ugolini y Dalhgren, 2002).

Los suelos volcánicos son meteorizados de acuerdo al siguiente orden: primero el vidrio volcánico se transforma en alofana, después en haloisita, seguido por metahaloisita, caolinita y montmorillonita (Fisher y Schmincke, 1984). Este orden indica la presencia de alofana en suelos jóvenes y haloisita en suelos más meteorizados (mayor edad). La presencia de montmorillonita y caolinita es escasa en suelos encontrados recientemente, debido a que son productos de la última fase de meteorización y están ubicados en estratos profundos (Herrera, 2005).

La alofana se utilizó por primera vez para hacer referencia al cambio frecuente de un material vítreo a uno con una apariencia terrosa, ocasionado por la pérdida de agua (Grim, 1968). De acuerdo con Mitchell (1993) la alofana no tiene una composición o forma definida y exhibe una gran variedad de propiedades físicas. Lenz (2009) afirma que la alofana de manera general siempre se encuentra asociada a la haloisita en depósitos de cenizas y materiales piroclásticos que contienen partículas de vidrio meteorizados y de reciente deposición (con buenas condiciones de drenaje), como los suelos de Java, Indonesia, los suelos tropicales de África, Japón, Nueva Zelanda y Centro-América.

Por otro lado, la haloisita y caolinita forman parte de los minerales conocidos como kanditas o minerales caoliníticos o dimorfóbicos, también llamados minerales 1:1. Estos están compuestos por una capa de tetraedros de sílice formando una lámina y una capa de octaedros de aluminio, con la cual comparten oxígeno (Figura 3). La haloisita se distingue por poseer una capa interior de moléculas de agua (Shoji *et al.*, 1993), es una especie de caolinita hidratada (Jordán, 2005), en algunos casos presenta altos contenidos de óxidos de hierro III (Fe_2O_3) en posición octaedral, superiores 15%, esto la distingue de las caolinitas (Velde, 1992) y calentada a 100°C se transforma en metahaloisita (Jordán, 2005). La presencia o ausencia de la capa de agua definen las formas hidratada y deshidratada de haloisita o metahaloisita, con espaciamientos basales de 10.1 Å y 7.2 Å respectivamente (Grim, 1968).

La haloisita (Figura 3) se forma por la meteorización de cenizas volcánicas y pumitas en lugares en los que la presencia de una estación seca favorece su cristalización a partir de materiales amorfos.

También puede haber en suelos tropicales intensamente meteorizados, en medio húmedo altamente lavado. Tiene una capacidad de intercambio catiónico entre 5 y 60 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$, y normalmente presenta una estructura tubular (Porta *et al.*, 2003).

La caolinita por su parte, es típica de suelos antiguos, ampliamente meteorizados (Porta *et al.*, 2003), en condiciones tropicales (especialmente en condiciones climáticas húmedas y calientes), pero también en vastas regiones de la zona templada; es conocida como un mineral de baja capacidad de cambio, los minerales puros tienen valores entre seis y diez $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$, pero la forma menos cristalizada en suelos a veces llega a unos 20 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ (Fassbender y Bornemisza, 1994). Puede estar asociada a los suelos ácidos, alguna evidencia sugiere que la caolinita poco cristalizada resulta de la transformación de la haloisita a medida que se deshidrata en los horizontes superficiales de los suelos con déficit de humedad distintos (Shoji *et al.*, 1993).

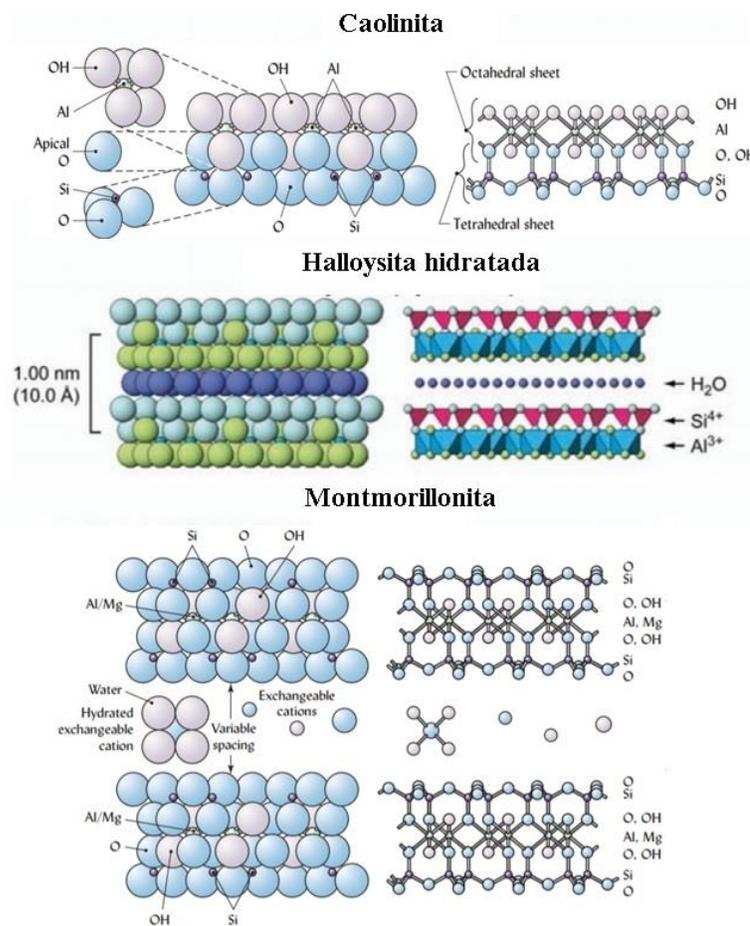


Figura 3. Esquema estructural de minerales del suelo a base de láminas octaédricas y tetraédricas. Fuente: Schulze (2002); Weil y Brady (2017).

La montmorillonita pertenece a los minerales trimorfbicos o 1:2. Estn formados por dos capas de tetraedros de silicio unidas a una capa central de octaedros de aluminio con la cual comparten oxgenos (Figura 3). En este grupo de minerales se acostumbra establecer dos subdivisiones que son: Las esmectitas o minerales montmorilloniticos y las ilitas o micas hidratadas que incluyen las vermiculitas (Fassbender y Bornemisza, 1994). Tienen capacidad de intercambio catinico del orden de 80-150 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ (Porta *et al.*, 2003) y son arcillas con una actividad coloidal, plasticidad y cohesin elevadas.

Segn Alvarado *et al.* (2014) normalmente las arcillas se asocian a xidos e hidrxidos de hierro, aluminio, manganeso y compuestos orgnicos de origen secundario. El principal agente colorante en los depósitos de arcilla se debe a los xidos de hierro. Los colores que van del amarillo al rojo y al marrn se deben a la presencia de estos minerales.

Segn Bigham *et al.* (2002) los xidos de hierro ms comunes son: hematita, maghemita, magnetita; hidrxidos: bernalita, ferrihidrita, green rust; y finalmente los oxi-hidrxidos de hierro: goethita y lepidocrocita. La distribucin de los diferentes compuestos de hierro es amplia, abarcando desde climas clidos hasta húmedos, por ejemplo, la goethita se encuentra en todos los regmenes de meteorizacin, con mayor cantidad en climas fríos y húmedos y materia orgnica elevada. La hematita por su parte es tpica en suelos aerbicos de trpicos, subtropicos, zonas áridas, semiáridas y climas mediterrneos con menor contenido de materia orgnica.

Los xidos de manganeso ms comunes: birnesita, todorokita (Figura 4), litioforita, vernadita. Normalmente se encuentran diseminados en suelos de diferentes edades y de diferentes materiales parentales. Casi siempre, se presentan como nódulos negros de uno o dos mm, en suelos antiguos como los vertisoles donde se ha producido ms turbulencia del paisaje, los nódulos se distribuyen por todo el perfil (Dixon y White, 2002).

Huang *et al.* (2002) indican que el aluminio difiere del Fe y el Mn porque slo puede formar unos pocos minerales de xido, hidrxido y oxihidrxido, de stos slo la gibbsita (hidrxido de aluminio) se encuentra en cierto grado en los suelos (Velde, 1992) y un segundo mineral es la boehmita que se puede encontrar ocasionalmente. La distribucin de la gibbsita (Figura 4) suele

ser en algunos andisoles (Allen y Hajek, 1989) que se ha formado en cenizas volcánicas que son desgastadas en un lapso de cientos o miles de años de erosión.

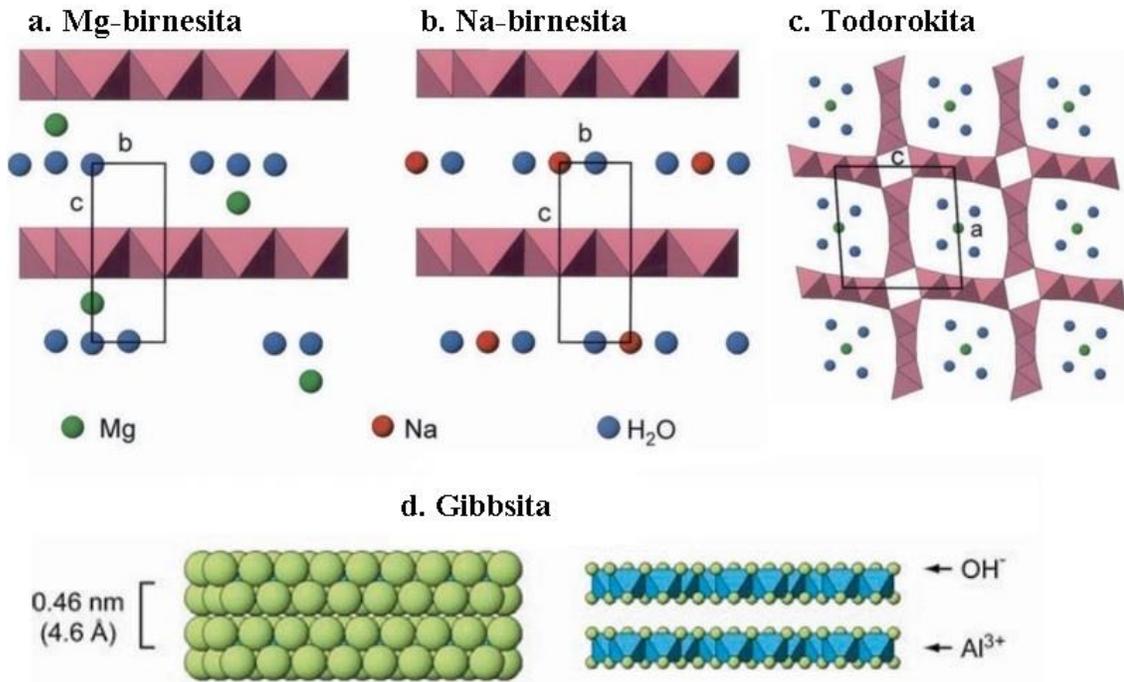


Figura 4. a. Modelo poliédrico de birnesita con iones intercalares divalentes más cercanos a las hojas octaédricas de Mn-O arriba y abajo, mientras que en (b) los iones monovalentes (Na) están en el centro de la intercepta. En todorokita (c), los cuatro círculos en el túnel central representan moléculas de agua alrededor del catión del túnel y en (d) esquema estructural de gibbsita. Fuente: Schulze (2002).

5.1.4. Propiedades de los suelos volcánicos

Los suelos formados en eyecciones volcánicas tienen propiedades morfológicas, físicas y químicas distintas, que rara vez se encuentran en suelos derivados de otros materiales parentales. Estas propiedades distintivas se deben en gran medida a la formación de materiales no cristalinos (alófono, imogolita, ferrihidrita, complejos Al / Fe-humus) y a la acumulación de carbono orgánico, los dos procesos pedogénicos dominantes que ocurren en los suelos volcánicos. La formación de materiales no cristalinos está directamente relacionada con las propiedades de la eyección volcánica como material principal, es decir, la rápida erosión de las partículas vítreas (Ugolini y Dalhgren, 2002; Dalhgren *et al.*, 2004).

Las propiedades más importantes de la alófana están relacionadas con su tamaño, estructura y tendencia a formar agregaciones. Estas características conducen a que los suelos con predominio

de alofana tengan alta capacidad de retención de agua y elevada porosidad, conformada por abundancia de micro y mesoporos (Shoji *et al.*, 1993). El contenido de alofana está relacionado con el ambiente de formación de los suelos; se ha observado que éste aumenta a menor altitud y en regiones con altitudes superiores a los 2000 m no se encuentra este mineral (Parfitt y Kimble, 1989). Lenz (2009) afirma que la alofana presenta propiedades plásticas anormales con respecto a otros suelos sedimentarios.

Las propiedades de humedad y plasticidad de la haloisita dependen de si su estructura mineral está hidratada o deshidratada. En general, la plasticidad de suelos que contienen haloisita es alta y los límites de Atterberg pueden variar entre: LL=70-100% y LP=55-75% (Wesley, 1973). El agua presente en la estructura mineral de la haloisita puede removerse de manera irreversible cuando se seca a 100°C (Velde, 1992). A menores temperaturas (60-75°C) la deshidratación ocurre solo parcialmente y el espaciamiento basal varía entre 7.36 y 7.9 Å. Al elevarse la temperatura a 400 °C se alcanza la forma deshidratada de haloisita con espaciamiento basal de 7.2 Å (Grim, 1968).

La fórmula mineral de la caolinita es $Al_2Si_2O_5(OH)_4$; el grosor de las dos capas de cationes coordinados es de 7 Å. La capa tetraédrica tiene un espesor cercano a 3 Å y la capa octaédrica cerca de 4 Å. El espaciado basal típico define este mineral de 7 Å, sus dimensiones celulares son: $c \sin \beta(001) = 7.16\text{Å}$; $b = 8.93\text{Å}$ (Velde, 1992).

La propiedad más destacable de la montmorillonita por sus implicaciones es la capacidad de expansión retracción interlaminar por el humedecimiento y secado con variaciones de volumen de 10 a 1, este comportamiento es más pronunciado en el orden vertisol y en subgrupos vérticos de otros órdenes de suelo (Schulze, 2002). Ello se debe a su estructura que posibilita la hidratación de los cationes interlaminares provocando la separación de las láminas.

Las propiedades de contracción-hinchamiento conducen a problemas de agrietamiento y desplazamiento cuando las casas, carreteras y otras estructuras se construyen sobre suelos esmectíticos, debiendo tomar medidas para disminuir los efectos (Schulze, 2002; Porta *et al.*, 2003).

5.2. Propiedades físicas, químicas y mecánicas de los suelos

Las propiedades físicas del suelo corresponden a la plasticidad asociada a los límites de Atterberg, ensayo granulométrico y la clasificación del suelo. Las propiedades químicas incluyen la capacidad de intercambio catiónico del suelo, porcentaje de sodio intercambiable, análisis elemental de arcilla y determinación de a lofana. Como propiedad mecánica del suelo es la compactación a través de la prueba de compactación próctor estándar.

5.2.1. Plasticidad

La plasticidad en mecánica de suelos se define como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse (Juárez y Rico, 1973).

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios como el de Atterberg, él hizo ver que la plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, si no circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia: 1. estado líquido, 2. estado semilíquido, 3. estado plástico, 4. estado semisólido y 5. estado sólido. Éstos estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen Criterios estrictos para distinguir sus fronteras. Atterberg, estableció las primeras convenciones para ello, bajo el nombre general de límites de consistencia.

5.2.1.1. Límites de Atterberg

El límite líquido, es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso. El límite plástico por su parte es el más bajo contenido de agua en el que el suelo sigue presentando plasticidad (Huezo y Orellana, 2009).

El límite líquido se determina con el uso de la copa de Casagrande, que es un recipiente de bronce o latón con un tacón solidario del mismo material; el tacón y la copa giran en torno a un eje fijo unido a la base. Sobre la copa se coloca el suelo y se procede a hacerle una ranura trapecial con un movimiento de arriba hacia abajo. El límite plástico según Terzaghi se logra cuando el diámetro

de los rollitos de suelo sea de 3 mm, la formación de éstos, se hace usualmente sobre una hoja de papel totalmente seca, cuando llegan al diámetro mencionado anteriormente, se doblan y presionan, formando una pastilla que vuelve a rolarse hasta que en los 3 mm justos ocurra el desmoronamiento y agrietamiento; en tal momento se determinará rápidamente su contenido de agua, que es el límite plástico (Juárez y Rico, 1973).

El índice de plasticidad (IP) es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil. El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el índice de plasticidad (Huezo y Orellana, 2009).

5.2.2. Ensayo granulométrico

El propósito de este ensayo es determinar las proporciones de los distintos tamaños de partículas existentes en el suelo. El tamiz es la herramienta fundamental para efectuar este ensayo; se trata de un instrumento compuesto por un marco rígido al que se halla sujeta una malla caracterizada por un espaciamiento uniforme denominado abertura, a través del cual se hace pasar la muestra de suelo a analizar (Roldán, 2010).

Se emplea una serie normalizada de tamices de malla cuadrada y abertura decreciente, a través de los cuales se hace pasar una determinada cantidad de suelos seco, quedando retenida en cada tamiz la parte de suelo cuyas partículas tengan un tamaño superior a la abertura de dicho tamiz. Una vez realizado el proceso de tamizado, se procede a pesar las cantidades retenidas en cada uno de los tamices, y se construye una gráfica semilogarítmica donde se representa el porcentaje en peso de muestra retenida (o el que pasa) para cada abertura de tamiz. Como aplicación directa de este ensayo, puede establecerse una clasificación genérica de suelos para atender a su granulometría (Roldán, 2010).

5.2.3. Clasificación SUCS

La clasificación de suelos es la categorización de los suelos y permite establecer las características ingenieriles de los mismos. Los sistemas de clasificación más utilizados son: USCS: Unified Soil Classification Systems (SUCS, en español) y AASTHO: American Association of State Highway

and Transportation Officials. Ambos métodos se basan en la composición granulométrica del suelo y los límites de Atterberg de la fracción fina (pasa la malla #40 o <0.4mm). La clasificación de suelos AASTHO se utiliza en caminos y la SUCS en cimentaciones, en la Figura 5 se presenta un esquema de la clasificación (ASTM D2487-17e1, 2017).

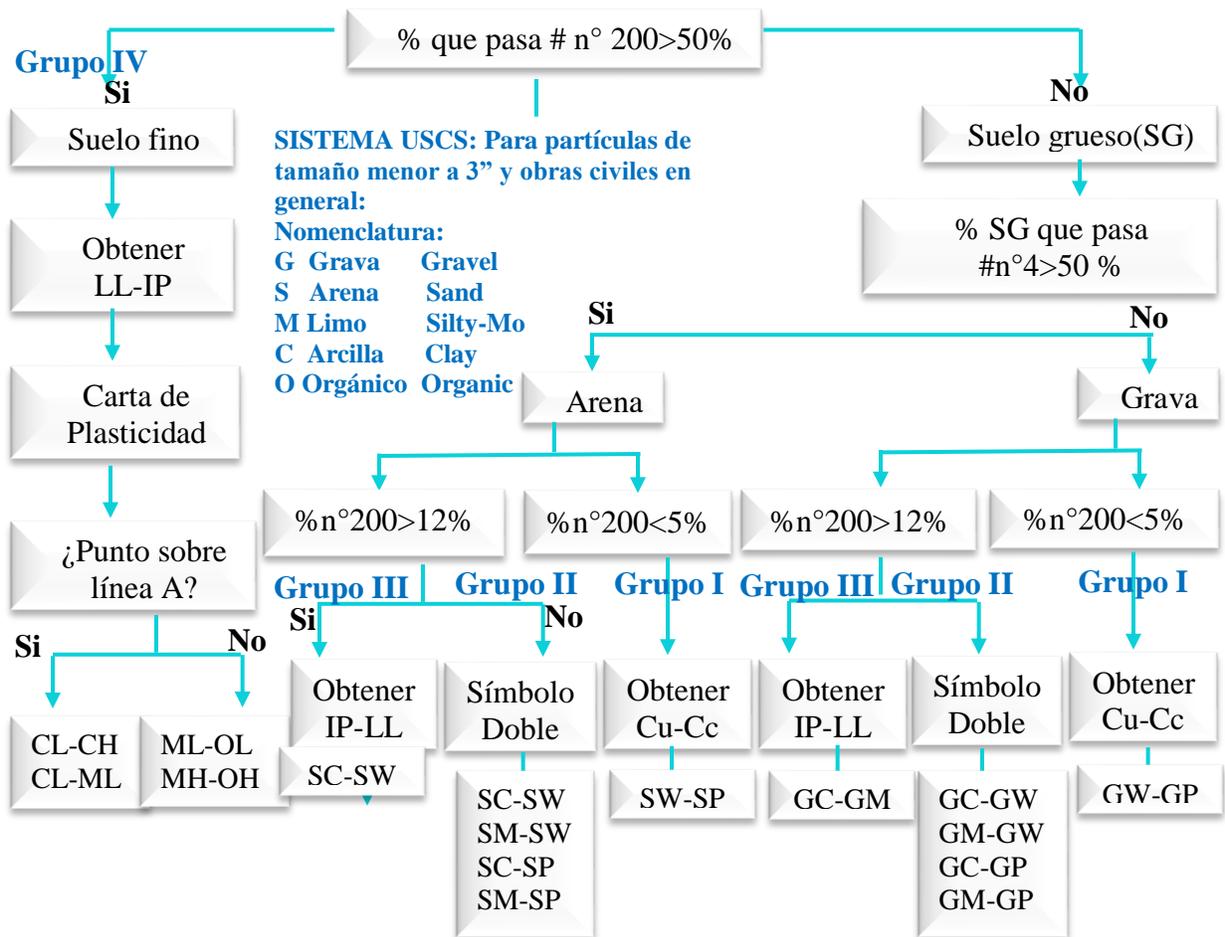


Figura 5. Diagrama de clasificación SUCS.

5.2.4. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) estima los sitios de carga de las arcillas, tanto las cargas permanentes, como las cargas dependientes de pH. Estos sitios de intercambio retienen por fuerzas electrostáticas a los cationes. La CIC es un indicador indirecto de la capacidad

amortiguadora de los suelos y que es función de la cantidad y tipo de arcilla, alófanos y materia orgánica (Yong *et al.*, 1990; Pérez *et al.*, 2017).

5.2.5. Porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Sumner (1993) afirma que el efecto negativo del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) sobre las propiedades físicas del suelo depende de varios factores como: la presencia de sales en la solución del suelo, la textura, el tipo de arcilla y la conductividad eléctrica del agua.

Los efectos de la sodicidad en las propiedades de los suelos pueden afectar adversamente el balance ecológico de un área. Estudios han demostrado que un alto PSI en el complejo de cambio del suelo puede provocar dispersión y expansión de las partículas de éste. La dispersión y el consecuente reordenamiento de las partículas del suelo obstruirían los espacios porosos, disminuyendo así el coeficiente de permeabilidad (Barreto *et al.*, 2003).

5.2.6. Análisis elemental de arcilla

Según Juárez y Rico (1973) hay varios procedimientos para identificar la constitución de una arcilla como el método por Rayos X y el balance térmico de las arcillas, que son los más conocidos; el microscopio electrónico proporciona datos útiles también, sobre todo en lo referente a forma y tamaño de las partículas minerales.

Los Rayos X se difractan a su paso a través de una muestra de arcilla y cada trayectoria de difracción es una imagen de distintos planos atómicos; el conjunto de trayectorias *retrata* la estructura interna de la arcilla. Así se revela un promedio de 2×10^7 láminas reticulares por centímetro de material. La difracción por Rayos X puede ser más informativa en general, pero a causa del pequeño tamaño de los cristales y su orientación desordenada, las trayectorias de difracción se definen y distinguen muy difícilmente (Juárez y Rico, 1973).

5.2.7. Determinación de alófana

La presencia de este mineral se detecta por medio de la prueba de fluoruro de sodio (Fieldes y Perrot, 1966) en la zona más superficial del lugar. El suelo se tiñe de color rosa.

5.2.8. Compactación del suelo

El concepto de compactación consiste en la aplicación de un procedimiento por medio del cual se reducen los vacíos del suelo con el fin de obtener una estructura más rígida, con mayor resistencia y menor compresibilidad y permeabilidad (Herrera, 2005).

Wesley (2005) afirma que los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan cambios fuertes e irreversibles en compactación debidos a desecación, la curva de compactación puede variar considerablemente con el secado del material como se muestra en la Figura 6.

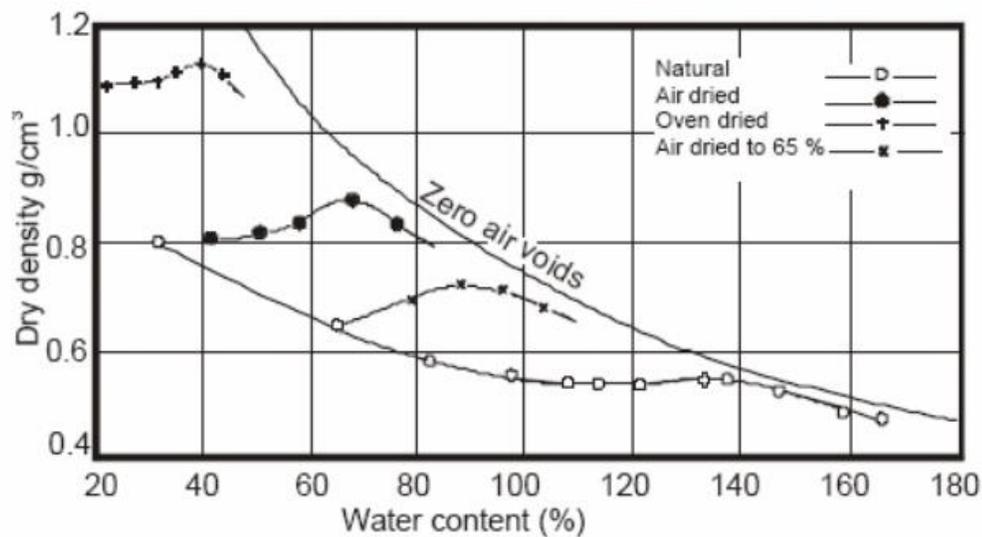


Figura 6. Comportamiento típico de compactación de arcilla alofánica. Fuente: Wesley (2003).

Cuando el suelo está en condiciones de humedad y densidad in situ, el máximo de densidad seca en la curva de compactación no es apreciable y consecuentemente tampoco lo es la humedad óptima, esto es debido a la contracción del suelo. El suelo natural se caracteriza por tener una estructura cementada altamente porosa capaz de almacenar grandes cantidades de agua ($w = 100\%$ y densidad seca $< 9 \text{ g cm}^{-3}$), se densificará ante la reducción de la humedad. La densificación es controlada por la cementación; mientras que esta permanezca, el aumento de la densidad por la reducción de la humedad será muy bajo para un rango amplio de humedades (Wesley, 2003; Herrera, 2005).

En los suelos derivados de cenizas volcánicas la aplicación de la compactación ha llevado a resultados disímiles respecto a los que son convencionalmente encontrados, estos resultados son

controlados por el grado de secado y remoldeo aplicados al material (Wesley, 2003). Por su parte Herrera (2005) recomienda que el material sea secado antes de la compactación.

Lenz (2009) publica los resultados obtenidos de la compactación realizada por impactos con la prueba próctor normal en arcillas volcánicas de Xalapa, México; encontrando valores de 43% de humedad y densidad seca de 1.25 g cm^{-3} .

Payán (2002) reporta datos de un suelo de tipo arena con arcilla(SC), utilizó 12% de cemento en un suelo que contenía 33% grava, 35% arena y 32% de finos. Encontró un valor de 1820 kg m^{-3} (1.820 g cm^{-3}) de densidad específica máxima para una humedad óptima del 15%.

5.2.9. Ensayo de compactación de suelos. próctor estándar.

La relación existente entre la densidad seca de un suelo (su grado de compacidad) y su contenido en agua es de gran utilidad en la compactación de suelos. Su regulación se realiza mediante el ensayo próctor en sus dos variantes, normal y modificado. La diferencia entre las dos variantes (próctor normal y próctor modificado) radica únicamente en la energía de compactación empleada, del orden de 4.5 veces superior en el segundo caso que en el primero (Roldán, 2010).

Este ensayo se aplica sólo para suelos que tienen 30% ó menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de $\frac{3}{4}$ " pulgada (19.0 mm). Un suelo con un contenido de humedad determinado es colocado en 3 capas dentro de un molde de ciertas dimensiones, cada una de las capas es compactada en 25 ó 56 golpes con un pisón de 5.5 lbf (24,4 N) desde una altura de caída de 12 pulgadas (305 mm), sometiendo al suelo a un esfuerzo de compactación total de aproximadamente de $12\ 400 \text{ pie-lbf/pe}^3$ (600 kN-m/m^3). Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de contenidos de agua para establecer una relación entre el peso unitario seco y el contenido de agua del suelo. Estos datos, cuando son graficados, representan una relación curvilínea conocida como curva de compactación. Los valores de óptimo contenido de agua y máximo peso unitario seco modificado son determinados de la curva de compactación (Bowles, 2006).

5.3. Estabilización de suelos

La estabilización de suelos es una serie de procesos mecánicos, físicos, físico-químicos y químicos que transforman las propiedades de los suelos que interesan en las aplicaciones de la ingeniería, obteniendo un material apto para su utilización, que busca mejorar las propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas (Higuera, 2010).

5.3.1. Tipos de estabilización de suelos

Un problema que se plantea el ingeniero diseñador, cuando no dispone de materiales granulares adecuados para la construcción, es decidir sobre el tipo de tratamiento adecuado para la estabilización de los suelos locales disponibles, con el fin de hacerlos aptos para el proyecto de ingeniería (Dorfman, 1988). En el Cuadro 1 se presentan diferentes tipos de estabilización del suelo, según el tipo de suelo por tratar, el diseñador debe determinar el tipo de estabilización más conveniente.

Cuadro 1. Tipos de estabilización.

Tipo	Estabilización	Produce
Mecánica	Compactación	Densificación
Física	Granulometría	Fricción y cohesión
	Suelo-betún	Cohesión e impermeabilización
Físico-química	suelo-cal-arcilla	Intercambio iónico y cementación
Química	suelo-cemento-arena	Cementación

Fuente: Dorfman (1988).

Sánchez (1985) aseguran que la estabilización mecánica se realiza por medio de la compactación, la cual aumenta la densidad, la resistencia mecánica y la capacidad de carga del suelo; reduce su compresibilidad y su aptitud para absorber y transmitir agua.

Por su parte Higuera *et al.* (2012) definen a la estabilización física como aquella que busca aumentar la fricción interna, la cohesión y la impermeabilidad del material. Cuando un material se ajusta granulométricamente por medio de adición de material con ciertos diámetros o ajustes a su

banda granulométrica, genera en el material resultante mayor fricción entre las partículas o cohesión de la masa del suelo.

La estabilización físico-química se realiza en suelos con gran cantidad de finos plásticos, como limos y arcillas especialmente. Si el suelo es tratado con hidróxido de calcio se produce en la masa de suelo resultante un intercambio iónico y cementación. Generalmente, con este tipo de estabilización se reduce la plasticidad del suelo, lo que aumenta su resistencia, trabajabilidad y estabilidad volumétrica (Higuera *et al.*, 2012).

Higuera *et al.* (2012) afirman que la estabilización química puede realizarse en suelos finos, mediante la adición de un agente hidráulico como el cemento Portland, que al mezclarse con el suelo y al desarrollar su propiedad hidráulica, produce una reacción química, intercambio iónico y cementación. La resistencia del suelo y su estabilidad aumentan significativamente con arenas puzolánicas. En el Cuadro 2, se presenta una comparación de los métodos de estabilización para diferentes materiales.

Cuadro 2. Comparación de técnicas de estabilización del suelo.

Material	Mecánica	Estabilización		
		Cemento	Cal	Emulsión
Grava natural	Puede ser necesaria la adición de finos para prevenir desprendimientos	Probablemente este no es necesario, salvo si hay finos plásticos. Cantidad: 2% - 4%	No es necesaria salvo que los finos sean plásticos. Cantidad de 2% - 4%.	Apropiada si hay deficiencias de finos, aproximadamente 3% de asfalto residual
Arena limpia	Adición de gruesos para dar estabilidad y de finos para prevenir desprendimientos	Inadecuada: produce material quebradizo	Inadecuada: No hay reacción	Muy adecuada. 3% a 5% de asfalto residual
Arena arcillosa	Adición de gruesos para mejorar resistencia	4% - 8%	Es factible, dependiendo del contenido de arcilla	Se puede emplear 3% a 4% de asfalto residual
Arcilla arenosa	Usualmente no es aconsejable	4% - 12%	4% - 8%, dependiendo del contenido de arcilla	Se puede emplear pero no es aconsejable
Arcilla pesada	Inadecuada	No es aconsejable. La mezcla puede mejorarse con un pretratamiento con 2% de cal y luego entre 8% y 15% de cemento	Muy adecuada, entre 4% y 8%, dependiendo del contenido de arcilla	Inadecuada

Fuente: IDU (2005).

5.4. Infiltración del agua en el suelo

La infiltración consiste en la penetración del agua de lluvia o riego en el suelo. La infiltración ocurre en dirección vertical o inclinada dependiendo de las características del suelo. El grado de infiltración de un suelo depende de la permeabilidad del suelo, la que a su vez está condicionada por la porosidad, la estructura o el grado de humedad (Jordán, 2006).

Permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la infiltración. Algunos suelos son tan permeables y la filtración tan intensa que para embalsar en ellos cualquier tipo de estanque es preciso aplicar técnicas de construcción especiales (FAO, 2020).

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad (FAO, 2020).

5.4.1. Coeficiente de permeabilidad del suelo

El coeficiente de permeabilidad se evalúa a partir de la velocidad de infiltración. Esta velocidad varía según el tipo de suelo y según el contenido en humedad que presente. Normalmente, la infiltración es máxima cuando el suelo se encuentra seco, y disminuye conforme el suelo se acerca a la saturación (Figura 7). De esta forma, si la humectación es constante, la permeabilidad del suelo disminuye hasta un valor mínimo con el paso del tiempo (Jordán, 2006).

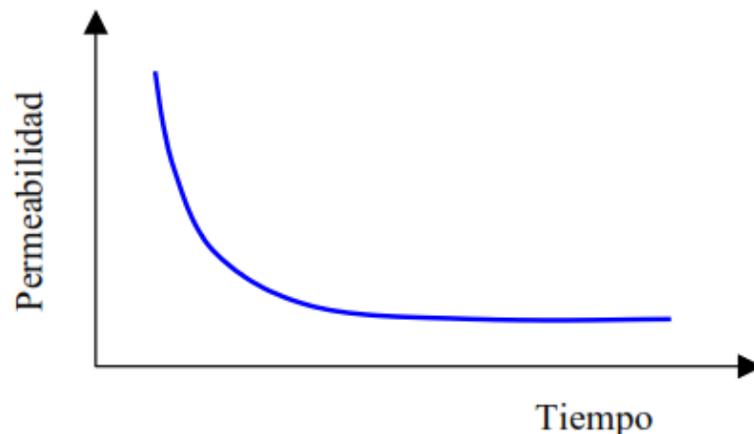


Figura 7. Variación de la permeabilidad del suelo en función del tiempo de humectación constante. Fuente: Jordán (2006).

La permeabilidad de un suelo puede medirse mediante su coeficiente de permeabilidad. Este coeficiente se puede determinar en el caso de que el flujo sea saturado, utilizando la Ley de Darcy (1856). Henry investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados

precisamente por materiales térreos, trabajando con dispositivos de diseño especial, esencialmente reproducidos como en la Figura 8.

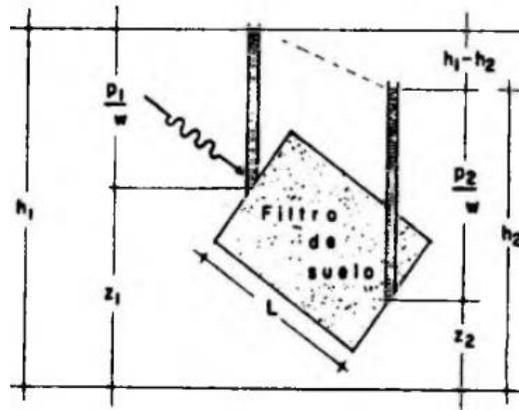


Figura 8. Esquema del dispositivo experimental de Darcy. Fuente: Jordán (2006).

Encontró que, para velocidades suficientemente pequeñas, el gasto queda expresado por la fórmula 1:

$$Q = \frac{dV}{dt} = kAi \left(\frac{cm^3}{seg} \right) \dots\dots\dots 1$$

A es el área total de la sección transversal del filtro e i el gradiente hidráulico del flujo, medido con la expresión 2.

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \dots\dots\dots 2$$

En cualquier punto del flujo la altura piezométrica h es la carga de la elevación z del punto, más la carga de presión en dicho punto ($\frac{p}{\gamma_m}$). La carga de velocidad se desprecia en razón de la pequeñez de las velocidades que el agua tiene a través del medio poroso. La diferencia $h_1 - h_2$ representa la pérdida de energía sufrida por el flujo en el desplazamiento L; esa energía pérdida se transforma en calor. La ecuación de continuidad (ecuación 3) del gasto establece que:

$$Q = Av \dots\dots\dots 3$$

Siendo A el área del conducto y v la velocidad del flujo. Llevando la expresión (3) a la (1), se deduce que:

$$v = ki \dots \dots \dots 4$$

En las ecuaciones anteriores, aparece una constante física de proporcionalidad, k, llamada Coeficiente de Permeabilidad del Suelo. En cualquiera de esas ecuaciones puede verse que sus unidades son las correspondientes a una velocidad (i es un concepto adimensional). Esto se ha utilizado para definir en términos simples el coeficiente de permeabilidad de un suelo como la velocidad del agua a través del mismo, cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario (ecuación 4) (Juárez y Rico, 1973).

5.4.2. Valores de referencia del coeficiente de permeabilidad

El departamento de agricultura de los estados unidos reporta valores del coeficiente de permeabilidad del orden de 10^{-6}cm s^{-1} (0.864 mmdia^{-1}) a 10^{-8}cm s^{-1} ($0.00864 \text{ mm dia}^{-1}$) para un suelo con contenido de arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas grava, arcillas arenosas, arcillas limosas y arcillas magras (USDA, 2012).

La FAO (2020) recomienda los valores mostrados en el Cuadro 3, para suelos en los que se construyen obras de ingeniería civil .

Cuadro 3. Coeficiente de permeabilidad para suelos de obras de ingeniería civil.

Clases de permeabilidad	Coeficiente de permeabilidad(cms^{-1})	
	Límite inferior	Límite superior
Permeable	2×10^{-7} ($0.1728 \text{ mmdia}^{-1}$)	2×10^{-1} ($172,800 \text{ mmdia}^{-1}$)
Semipermeable	1×10^{-11} ($0.0000086 \text{ mmdia}^{-1}$)	1×10^{-5} (8.64 mmdia^{-1})
Impermeable	1×10^{-11} ($0.0000086 \text{ mmdia}^{-1}$)	5×10^{-7} (0.432 mmdia^{-1})

Fuente: FAO (2020).

Para la piscicultura en estanques con fines comerciales se considera aceptable una tasa media de filtración de $1 \text{ a } 2 \text{ cm dia}^{-1}$ ($10 \text{ a } 20 \text{ mm día}^{-1}$), pero es preciso tomar medidas correctivas para reducir la permeabilidad del suelo cuando existen valores más altos, en particular cuando alcanzan los 10 cm dia^{-1} (100 mm día^{-1}) o más (FAO, 2020).

Por su parte Jaramillo (2002) en su manual realizado para el diseño de rellenos sanitarios reporta una escala logarítmica del coeficiente de permeabilidad en cm s^{-1} , donde relaciona el tipo de suelo, su aceptación para drenaje y relleno sanitario (Figura 9), se puede observar que un relleno sanitario

con drenaje prácticamente impermeable en suelo modificado por efecto de la vegetación y la intemperización el valor oscila entre 10^{-6}cm s^{-1} (0.864 mm dia^{-1}) a 10^{-9}cm s^{-1} ($0.000864\text{ mm dia}^{-1}$).

k(cm/s)	10^2	10^3	10	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Drenaje	Bueno			Malo			Prácticamente impermeable					
Relleno Sanitario	Pésimo									Bueno		
Tipo de suelo	Grava Gruesa (cascajo)	Arena limpia, arena mezclada con grava		Arena muy fina, suelos Orgánicos e inorgánicos mezcla de limo-arenoso y arcilla				Suelo impermeable modificado por efecto de la vegetación y la intemperización				
			Suelo impermeable; por ejemplo: arcilla homogénea debajo de la zona de intemperización									

Figura 9. Relación entre el tipo de suelo con el coeficiente de permeabilidad, drenaje y relleno sanitario. Fuente: Jaramillo (2002).

Crespo (2004) sugiere valores de permeabilidad para suelos impermeables como las arcillas homogéneas bajo la zona de meteorización de $1 \times 10^{-7}\text{cm s}^{-1}$ ($0.0864\text{ mm dia}^{-1}$) a $1 \times 10^{-9}\text{cm s}^{-1}$ ($0.000864\text{ mm dia}^{-1}$). En suelos impermeables que han sufrido alteración por la vegetación y la meteorización el valor oscila entre $1 \times 10^{-2}\text{cm s}^{-1}$ (8640 mm dia^{-1}) a $1 \times 10^{-7}\text{cm s}^{-1}$ ($0.0864\text{ mm dia}^{-1}$).

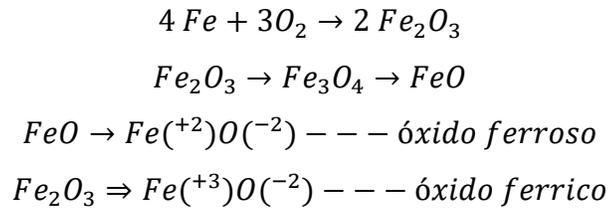
A partir de los coeficientes de permeabilidad límite reportado para pequeños bordos de almacenamiento, se adoptó un límite máximo permitido de 0.864 mm día^{-1} .

5.4.3. Métodos de control de infiltración en el suelo

La filtración es un factor muy importante que debe estudiarse cuidadosamente durante el diseño de una presa de tierra. Khattab (1991) afirma que una filtración excesiva puede amenazar la estabilidad de la presa y provocar su falla, además si la presa se usa para almacenar agua, el agua filtrada se considera como pérdida económica. Existen métodos de control de filtración; estos métodos incluyen cortes de cimientos, zonas impermeables, zonas de transición, material de drenaje y mantas, mantas impermeables aguas arriba, área de contacto del núcleo adecuada y pozos de alivio(USACE,2004).

5.4.3.1. Sellado biológico (Gleyzación)

Según Moreno e Ibáñez (2020) la gleyzación es un proceso natural de formación de los suelos en el que se produce el gley, se caracteriza por la reducción del hierro en condiciones anaeróbicas que han sido causadas por saturación de agua. En condiciones de hidromorfismo continuo y bajo condiciones de saturación, el hierro pasa de forma férrica a forma ferrosa (valencia $+2$).



Esto provoca una coloración azul-grisácea, que da lugar al gley. Es en dicha situación, cuando todos los óxidos de hierro que dan coloración marróncea – rojiza son eliminados y se produce una homogeneización del perfil, dando lugar a matrices completamente grisáceas. La reducción se da en la combinación simultánea de las siguientes condiciones: presencia de materia orgánica, ausencia de suministro de oxígeno y presencia de microorganismos anaeróbicos en un ambiente adecuado para su crecimiento.

Para probar el control de la infiltración (Nicholaichuk, 1978) realizó varios experimentos a campo abierto y en laboratorio; en campo abierto combinó suelo-estiércol y suelo-paja y en laboratorio: suelo-bentonita y suelo-carbonato de sodio. El experimento con suelo-paja se realizó en dos condiciones: tomando una capa superficial del suelo y otra del subsuelo. Los suelos utilizados estaban constituidos por 47% de arcilla, 28% de arena y 25% de limo. La fracción arcillosa contenía 45% de illita y el resto de montmorillonita, la densidad aparente fue de 1.25 g cm^{-3} . A las 7.5 semanas, el coeficiente de permeabilidad para cada condición de prueba fue similar, aunque inicialmente la capa de paja cubierta con la capa superior del suelo tendió a causar una conductividad más alta que el tratamiento en el que la paja fue cubierta con el subsuelo.

Finalmente encontró que la paja del trigo, cebada, avena y el estiércol son materiales que pueden utilizarse para promover la gleyzación. La paja de avena no fue tan eficaz como los otros dos materiales de cereales. El uso de estiércol parcialmente podrido redujo la infiltración más rápidamente que la paja, pero finalmente ambos fueron igualmente eficaces.

El proceso de gleyzación se ve mejorado por el bajo nivel de oxígeno y también las altas concentraciones de carbono soluble (Russell, 1973). Tanto la paja como el estiércol tienen un alto contenido de carbono, pero este último, al estar parcialmente en descomposición, probablemente sea más alto en forma soluble, de igual forma el proceso funciona mejor cuando se tiene al menos 15% de arcilla presente en el suelo (Nicholaichuk, 1978).

El estudio de laboratorio demostró que el carbonato de sodio y la bentonita proporcionaban la reducción más rápida del coeficiente de permeabilidad seguido del estiércol y la paja, respectivamente. La combinación del método de gleyzación con carbonato de sodio o bentonita resultó en un sellado inmediato del tratamiento. Después de 2 años, la tasa de filtración con el uso de la paja y el estiércol se redujo a un nivel aceptable de 0.05 cm h^{-1} (12 mm día^{-1}).

Por su parte McConkey *et al.* (1990) reportan datos de un canal de riego inundado intermitentemente y revestido con el método de gleyzación mejorado, es decir, una capa de paja enterrada ($7 \text{ a } 10 \text{ kg m}^{-2}$) y carbonato de sodio (a razón de 0.32 kg m^{-2}) incorporado en el suelo. Realizaron mediciones de las tasas de filtración durante un lapso de seis años, las cuales fueron bajas para el primer año, en los años posteriores las tasas fueron casi similares a un suelo sin tratar. La gleyzación incluso cuando se combina con el carbonato de sodio incorporado en el suelo, no proporcionó una filtración satisfactoria a largo plazo. Como ejemplo se menciona una sección del canal con 37.2% de arena, 28.4% de limo y 34.3% de arcilla, la filtración en el primer año fue de $0.89 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($21.36 \text{ mm día}^{-1}$), cinco años después se realizó otra vez la medición, encontrando un valor de $2.03 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($48.72 \text{ mm día}^{-1}$).

Ahmad *et al.* (1996) comparó tres tratamientos: químico, físico y biológico en suelo constituido por 17% de arcilla, 21% limo y 62% arena. El método químico consistió en tratar los 10 cm superiores del suelo con carbonato de sodio a razón de 2.5 t h^{-1} . El método físico implicaba la compactación del suelo y el método biológico (el llamado “sándwich bioplástico”) consistió en capas sucesivas de tierra, estiércol, material vegetativo y tierra. Después de 350 días de la humectación inicial; el tratamiento químico demostró ser menos eficiente ($K = 7.1 \text{ cm día}^{-1}$ (71 mm día^{-1})). En comparación con el suelo no tratado, los métodos físicos y biológicos redujeron las tasas de infiltración acumuladas medias en 72% ($2.5 \text{ cm día}^{-1} = 25 \text{ mm día}^{-1}$) y 67% ($3.0 \text{ cm día}^{-1} = 30 \text{ mm día}^{-1}$). El valor inicial del suelo sin tratar fue de 9 cm día^{-1} (90 mm día^{-1}).

Teichert-Coddington *et al.* (1989) mediante un estudio realizado con basura de pollo compuesta de cáscaras de arroz, excrementos de pollo, plumas y residuos de alimentación. Obtuvieron un sellado satisfactorio en laboratorio en un plazo de 2 a 64 días en suelos que van desde arcillas hasta arenas, en suelos franco-arenosos y arenosos (Chang *et al.*, 1974). El sellado efectivo de los estanques de almacenamiento con estiércol se produjo en un plazo de 3-4 meses (Davis *et al.*, 1973; Miller *et al.*, 1985) y la mayor reducción de la filtración se produjo en las primeras semanas. En este estudio, la filtración de todos los estanques se estabilizó en un rango de 7-12 mm día⁻¹.

5.4.3.2. Sellado con dispersantes de partículas

El sellado con dispersantes de partículas como el tripolifosfato de sodio (STPP) ($Na_5O_{10}P_3$), cloruro de sodio ($NaCl$), fosfato de sodio (Na_3PO_4), silicato de sodio (Na_2SiO_3), hidróxido de sodio ($NaOH$) y carbonato de sodio (Na_2CO_3), se utilizan para reducir la infiltración de agua en los estanques construidos en suelos arcillosos bien estructurados (agregados), como por ejemplo la tierra roja o los suelos dilatados arcillosos floculados (Nicholaichuk, 1978; Neft, 1980; Pfof *et al.*, 1997; Pepper, 1983; Barreto *et al.*, 2003; Ono y Kubitza, 2003; Yiasoumi, 2004).

Según Pepper (1983) el tripolifosfato de sodio es generalmente el más eficaz, porque reduce las pérdidas por infiltración. Al aplicar una dosis de 0.4 kg m⁻³ a una presa con cierto volumen de agua de un suelo intermedio entre limo arenoso y arcilloso arenoso constituido por 53% de arena gruesa, 20% de arena fina, 5% de limo y 22% de arcilla. Con CIC (1.4 a 2.1 cmol_c kg⁻¹), siendo el Mg el catión intercambiable dominante, con minerales arcillosos como: caolinita 95% y goetita, 5%. Observó que después de 60 días la infiltración se redujo a 0.1 mm día⁻¹.

Por su parte Yiasoumi (2004) sugiere que el STPP, en forma de polvo, se aplique sobre el área a tratar (el suelo debe estar cerca de su contenido óptimo de humedad), una dosis aproximada de 0.5 kg m⁻², utilizando una azada rotativa y debe compactarse con un rodillo. Finalmente, el área debe cubrirse con tierra sin tratar para evitar que la mezcla STPP / tierra se seque y se agriete. Se recomienda un espesor compactado de aproximadamente 300 mm, es importante recalcar que el STPP es ineficaz en suelos arenosos o suelos con alto contenido de carbonato de calcio.

Nicholaichuk (1978) utilizó el carbonato de sodio en suelo con 28% de arcilla, 31% de arena y 40% de limo, con densidad de 1.3 g cm^{-3} la infiltración fue inmediata y se redujo hasta en 0.01 cm h^{-1} (2.4 mm día^{-1}).

Barreto *et al.* (2003) estudió 8 tratamientos de un suelo aluvial de textura franco arenosa. Utilizando carbonato de sodio en diferentes concentraciones, varió el PSI y determinó que, al aumentar este porcentaje, el coeficiente de permeabilidad disminuyó considerablemente desde 3.61 cm h^{-1} (866 mm día^{-1}) hasta 0.11 cm h^{-1} (26.4 mm día^{-1}) para un PSI del 64.1%. El suelo utilizado estaba constituido por 60.8 g kg^{-1} (60.8%) de arena, 315 g kg^{-1} (31.5%) de limo y 77 g kg^{-1} (7.7%) de arcilla. La composición arcillosa contenía ilita, caolinita y montmorillonita. La CIC fue $12.10 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$, la cantidad de sodio (Na) de $0.12 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$.

Por su parte Neff (1980) al estudiar un suelo con textura de aproximadamente 36% de arena, 32% de limo y 32 % de arcilla; con (CIC) de $34 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ y el sodio intercambiable fue muy bajo ($<0.25 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$). Determinó que 6.7 ton ha^{-1} de carbonato de sodio era el óptimo para lograr la máxima reducción de filtración (4 mm día^{-1}) durante 3 años, después de ese tiempo las pérdidas por filtración continuaron y se recomienda aplicar nuevamente la dosis a los embalses cada 2 o 3 años.

Ono y Kubitzka (2003) recomiendan que los dispersantes se incorporen homogéneamente en una cama de 15 a 20 cm del suelo del fondo y en los laterales del estanque drenado y seco. La dosis frecuentemente utilizada de estos productos es: tripolifosfato de sodio: 0.25 a 0.5 kg m^{-2} ; hidróxido de sodio: 0.6 a 1.0 kg m^{-2} y cloruro de sodio: 1.2 a 1.8 kg m^{-2} . Sugieren controlar la humedad a fin de posibilitar que el suelo arado y mezclado con el dispersante pueda ser compactado eficientemente. Existen otras dosificaciones como las que reporta (Pfof *et al.*, 1997) con valores para el carbonato de sodio que van de: 0.5 a 1.25 kg m^{-2} y cloruro de sodio: 1.0 a 1.6 kg m^{-2} .

Para obtener mejores resultados con el sellado químico (Pfof *et al.*, 1997) recomienda que el suelo contenga al menos 15% material más fino que el tamaño de la arcilla (0.002 mm). Esto porque los dispersantes cambian la estructura del suelo, reemplazando un ión calcio bivalente con un ion de sodio monovalente. Los aditivos químicos funcionan solo cuando las partículas de arcilla están presentes en grupos.

5.4.3.3. Sellado con Bentonita

La bentonita sódica contiene un elevado nivel de iones de sodio por lo que se expande con el contacto del agua, absorbe varias veces su peso seco en agua y puede aumentar hasta 12 veces su volumen. Debido a sus excelentes propiedades coloidales se utiliza a menudo en lodos de perforación de pozos de petróleo y gas y para la investigación geotécnica y ambiental. La peculiaridad de expansión hace a la bentonita sódica ventajosa para la impermeabilización de muros, formación de barreras impermeables para sellar y tapar pozos de agua y para revestir la base de vertederos que eviten la migración de lixiviados (CGM, 2012; Racchumí, 2018).

La permeabilidad de los suelos de grano grueso (arenas y gravas) puede reducirse considerablemente mezclando los suelos con bentonita. Al humedecerse, la bentonita se hincha hasta multiplicar por varias veces su volumen seco (Pfof *et al.*, 1997; Yiasoumi, 2004; PWN, 2007). La bentonita es más efectiva en suelos que contienen menos del 50% de finos y con índices de plasticidad inferiores a 15 (Pfof *et al.*, 1997), también recomienda tasas que varían de una libra por pie cuadrado (4.88 kg m^{-2}) para un suelo con algo de arcilla, hasta 3 libras por pie cuadrado (14.65 kg m^{-2}) para un material de arena y grava. Esta tasa es por cada elevación de 4 pulgadas (0.1016 m). El espesor mínimo del área tratada y terminada debe ser de 4 pulgadas (0.1016 m) para profundidades de agua de hasta 8 pies (2.43 m).

Racchumí (2018) al realizar un ensayo de permeabilidad a carga constante en muestras de suelo obtenidas en la base de un canal, encontró que agregándole un 10% de bentonita sódica a la grava hormigón (siendo arena fina ($K = 10^{-2}$ a $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$), esta disminuye considerablemente su permeabilidad, pasando según grado de permeabilidad de suelo, de media ($K=10^{-1}$ a $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$) a muy baja ($K = 10^{-5}$ a $10^{-7} \text{ cm s}^{-1}$) favoreciendo la base del canal.

Yiasoumi (2004) sugiere que la bentonita se aplique a una dosis de 7 kg m^{-2} , eliminando rocas sueltas y vegetación, mezclando ligeramente los primeros 150-200 mm de suelo y compactando con un rodillo.

5.4.3.4. Sellado con suelo-cemento

La permeabilidad del suelo-cemento dependerá principalmente del tipo de suelo. Suelos finos darán capas impermeables, suelos predominantemente granulares no debe esperarse alcanzar siempre permeabilidades lo suficiente bajas como para sellar estructuras de almacenamiento de agua. Cuando el suelo es granular con finos es común utilizar cal y cemento (De la Fuente, 2013).

Payán *et al.* (2017) estudiaron las características de diferentes materiales como sahcab (tierra blanca), cemento y la mezcla sahcab-cemento (Payán, 2002) y encontraron que, el coeficiente de permeabilidad obtenido en la combinación del suelo-cemento para tres diferentes bancos clasificados de acuerdo al estándar SUCS de la siguiente manera: Banco 1. SC (arena arcillosa), Banco 2. SM (arena limosa) y Banco 3. CL (arcilla de baja plasticidad) fue de $2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-1}$ ($0.017 \text{ mm día}^{-1}$); $2 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ ($17.28 \text{ mm día}^{-1}$) y $3 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-1}$ ($0.026 \text{ mm día}^{-1}$) respectivamente, comparado con el proporcionado por la geomembrana que fue de $10^{-13} \text{ m s}^{-1}$ ($8.64 \times 10^{-8} \text{ mm día}^{-1}$) en la impermeabilización de rellenos sanitarios. Para los bancos 1 y 3 se empleó el 10% de cemento en peso del suelo.

Por su parte Toirac (2008) sugiere que los suelos aptos para mezclas de suelo-cemento son aquellos cuyos consumos de cemento en peso se encuentren entre 5% y 12% con respecto al peso del suelo. Además, que la laborabilidad sea tal que permita la producción de los elementos a fabricar. También recomienda que los suelos aptos para la estabilización con suelo-cemento deben presentar porcentajes menores 45% en su límite líquido y menores al 18% en su límite plástico.

5.4.3.5. Sellado con suelo-cal

Se ha demostrado durante la última década que las tecnologías de tratamiento apropiadas en suelos tratados con cal pueden conducir a diseños innovadores de diques y presas de vertederos al abordar algunos de los diseños típicos, como la estabilidad, la estanqueidad, la erosión interna, la protección de superficies y el control de inundaciones (al 4%).

Por su parte Little (1995) reporta que el tratamiento con cal de los suelos ha crecido considerablemente desde mediados de 1940 para la estabilización de la grava y arena arcillosas utilizadas en la construcción de bases de pavimento de carreteras, autopistas, aeródromos,

ferrocarriles, etc. En Europa, desde hace más de 60 años, la técnica también se ha desarrollado para mejorar y estabilizar suelos limosos y arcillosos en movimientos de tierras para el mismo campo de aplicaciones.

Little (1995) define la cal aire-calcio como un reactivo obtenido por calcinación de piedra caliza pura. Puede estar en forma de óxido de calcio (CaO) también llamado cal viva, o en forma de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) también llamado cal hidratada. Cuando se mezcla con una tierra que contiene arcilla, la cal reacciona de manera diferente que un cemento. A corto plazo: reduce el contenido de humedad, particularmente cuando se usa cal viva, floculación de los minerales arcillosos, modificación de las características geotécnicas (límites de Atterberg y curva próctor) y aumento de la capacidad de carga (CBR inmediato). A largo plazo: hay combinación lenta con los minerales arcillosos del suelo (reacción puzolánica).

Huezo y Orellana (2009) afirman que, generalmente la cal reacciona con suelos plásticos que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. Suelos con IP menores a 10, usualmente, no reaccionan tan fácilmente con la cal.

Herrier *et al.* (2013) analizaron un canal de riego ubicado al sureste de Fresno, California, que fue construido entre 1945 y 1951, principalmente con arcilla montmorillonita altamente expansiva. Debido a la degradación que presentó después de la construcción, se llevaron a cabo operaciones de rehabilitación entre 1973 y 1977, el tratamiento del suelo se realizó con cal viva a 4%, lo que redujo el índice de plasticidad de 47% a 12% y aumentó el límite de contracción de 7% a 26%.

Herrier *et al.* (2013) realizaron una visita en el año 2010 (Figura 10), 35 años después observaron que la huella del rodillo todavía era visible tanto por encima como por debajo de la superficie del agua. Cuando el nivel del agua está por debajo del normal, se puede ver una erosión menor a lo largo del nivel del agua, debido a la salida de rocas pequeñas o “bolas de arcilla no tratadas”, que no se mezclan eficientemente con la cal debido a la baja calidad de la mezcla. Las operaciones de mantenimiento fueron muy limitadas en esta sección, teniendo en cuenta que la parte tratada con cal es duradera y se ahorra dinero en mantenimiento.



Figura 10. Sección tratada con cal del canal Friant-Kern (tomada en noviembre de 2010) en la parte izquierda; la parte derecha consiste en una pendiente original no tratada cubierta de grava. Fuente: Herrier *et al.*, (2013)

Finalmente, Nerinx *et al.* (2016) concluyeron que, el tratamiento con cal de los suelos, a partir de los años 70 en Estados Unidos, en la restauración y construcción de estructuras hidráulicas solo se puede hacer con el conocimiento de las propiedades adecuadas de los suelos con cal y su evolución.

En otro estudio Mendoza *et al.* (2016) realizaron diversas pruebas en laboratorio para caracterizar al suelo que se pretendía estabilizar, se eligió la cal hidratada como el aditivo más favorable debido a la reducción que genera en la plasticidad de los suelos expansivos y por su bajo costo. Determinaron que el porcentaje óptimo de cal resultante para estabilizar el suelo (arcilla altamente plástica) es de 11% por motivos de reducción de plasticidad, mejoras mecánicas y facilidad de mezclado. El suelo estudiado contenía muscovita (0.4-0.5), caolinita (0.5-0.75), ilita (0.75-1.25) y montmorillonita (>1.25). Los valores del límite líquido (LL), límite plástico(LP), límite de contracción(IC) e índice de plasticidad (IP) fueron del orden de 59,24,7.67 y 35 respectivamente.

6. METODOLOGÍA

En este apartado, se describe el medio biofísico del área de estudio, las determinaciones físicas, químicas y mecánicas del suelo; así como la descripción del análisis estadístico.

6.1. Descripción del área de estudio

6.1.1. Localización

El área de estudio se ubica en el ejido de Santo Domingo Agua Zarca en las coordenadas $20^{\circ} 9'43.18''N$ latitud norte y $98^{\circ}29'42.65''O$ longitud oeste (Figura 11), municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo. El área forma parte del eje Neovolcánico transversal, específicamente en la subprovincia de llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo.

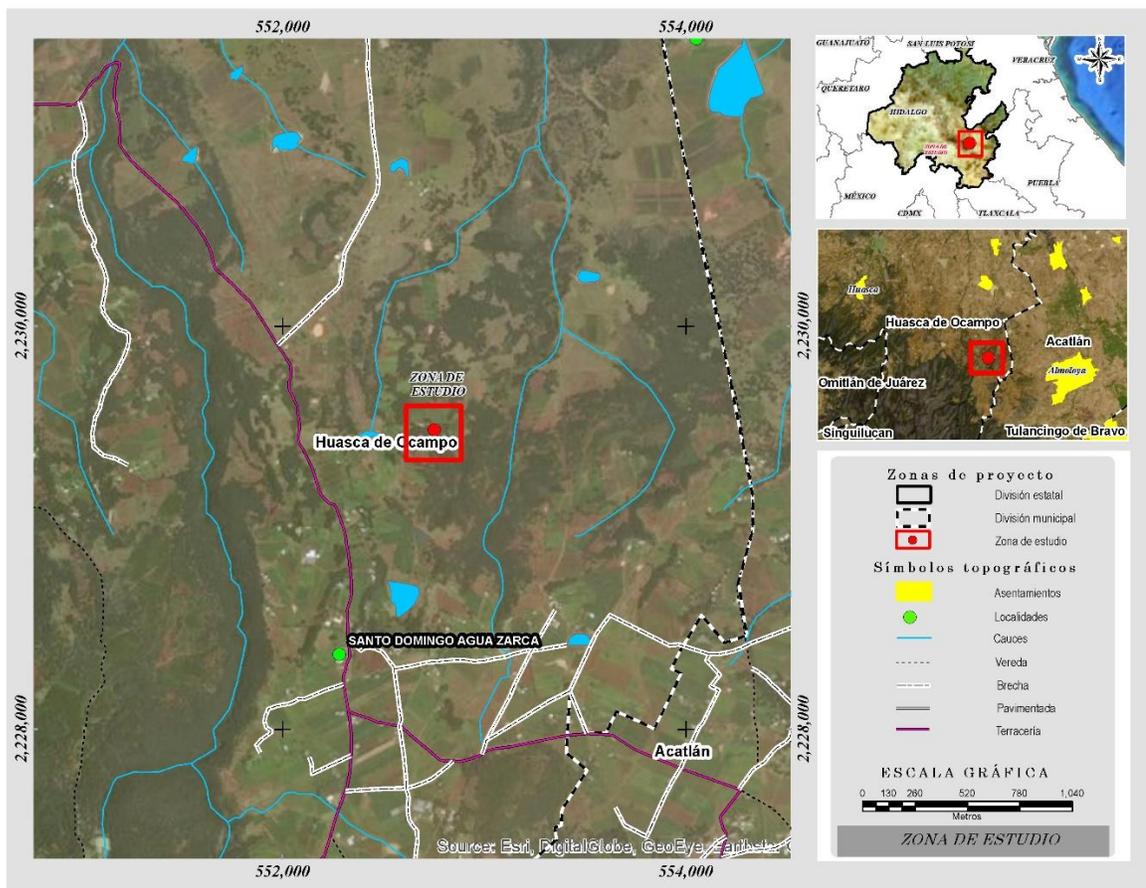


Figura 11. Localización del área de estudio.

6.1.2. Clima

La zona de estudio se caracteriza por presentar un clima templado sub-húmedo, con variaciones de temperatura debido principalmente a la variación altitudinal entre planicies, valles y montañas; asociado a comunidades vegetales de pino y encino en las partes altas y a vegetación de chaparral en las partes bajas (CEE, 1999). Las lluvias se presentan en verano, con una variación entre 566 y 1,222 mm con un promedio de 862 mm; se presenta valores máximos en el mes de septiembre (187 mm) y mínimos en el mes de diciembre (8 mm). La temperatura media anual es de 17 °C, con máxima durante el mes de mayo 18.2 °C y mínima en el mes de enero 12.2 °C (Hernández *et al.*, 2019).

6.1.3. Suelos

Hernández *et al.* (2019), al realizar la descripción del perfil del suelo en cárcavas, indicó que el suelo corresponde a un vertisol crómico que son suelos de arcillas pesadas con una alta proporción de arcillas expandibles. La expansión y contracción de estas arcillas dan lugar a grietas profundas en la temporada seca, y a la formación de slickensides. Este tipo de suelo está asociado con sedimentos que tienen un alto contenido de arcillas esmectíticas o que producen estas arcillas por una meteorización post-depósito y en mesetas amplias de basalto.

6.1.4. Geología

El área de estudio se encuentra en una transición entre las provincias fisiográficas del Sistema Volcánico Transversal y la Sierra Madre Oriental. El Sistema Volcánico Transversal está formado por rocas volcánicas del plioceno hasta pleistoceno y la Sierra Madre Oriental, formada por rocas de origen marino del mesozoico. Desde el punto de vista geomorfológico, la zona de Huasca de Ocampo se caracteriza por tener conos de escoria y mesetas lávicas basálticas, piedemontes volcánicos del pleistoceno y laderas lávicas (basalto-riolita), laderas de montañas plegadas y barrancas tectonizadas de rocas sedimentarias marinas y planicies acumulativas de origen fluvial (López y Palacio, 1995 citado por Hernández *et al.*, 2019).

6.1.5. Evaporación en el sitio de estudio

La evaporación promedio del sitio de estudio es de 104.83 mm día⁻¹ de acuerdo con la estación 13116 (El Zembo) ubicada en Huasca de Ocampo, Hidalgo. El periodo de registro considerado es de 1951 al 2010.

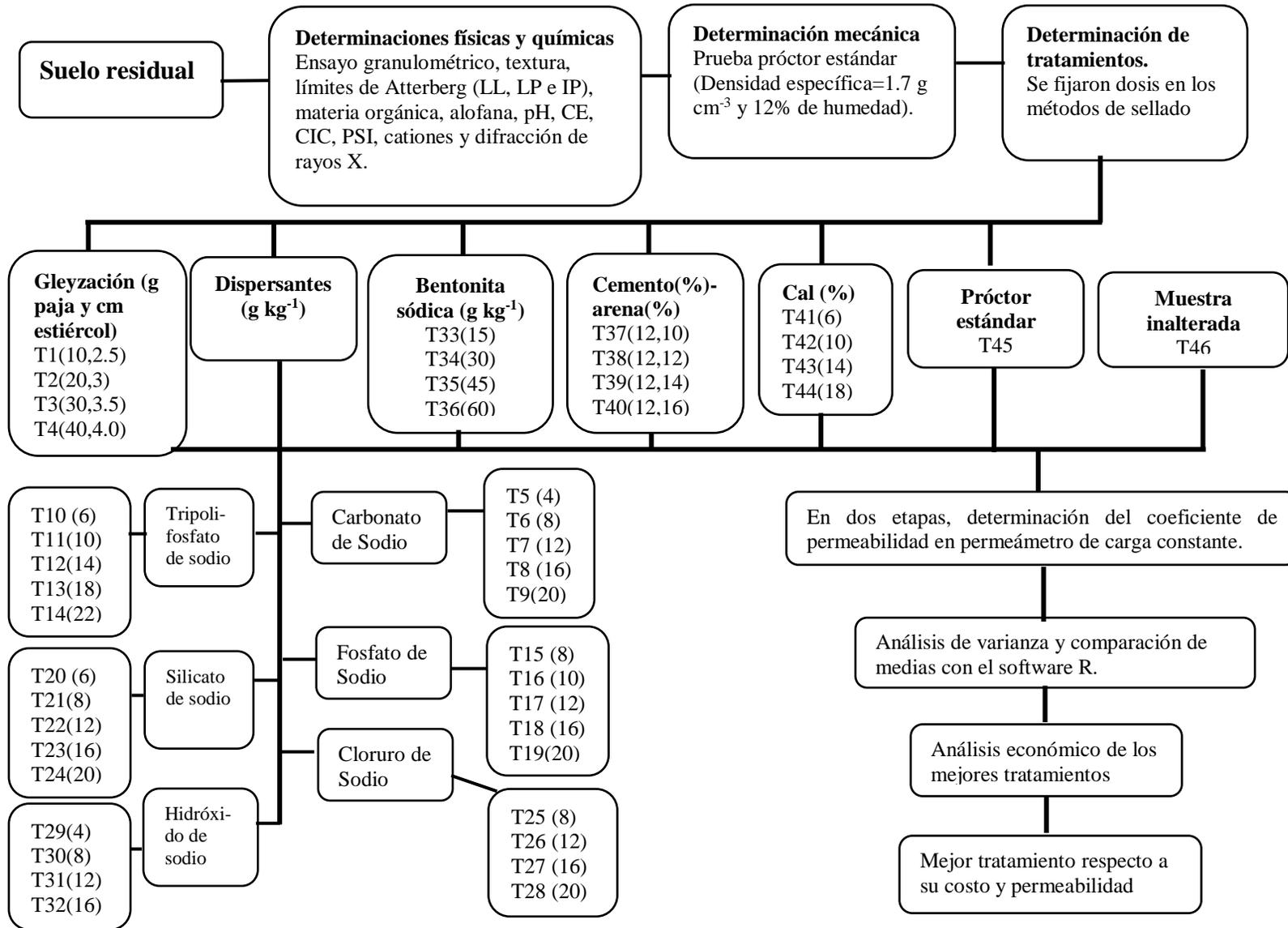
6.2. Muestreo de suelo

Para conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo, se realizó un muestreo en el sitio de una posible construcción de una obra de almacenamiento. Con el uso de una retroexcavadora, se realizaron calicatas a una profundidad de uno a dos metros.

6.3. Materiales y métodos

El procedimiento seguido en la investigación consistió en primer lugar, realizar determinaciones físicas y químicas del suelo residual, seguido por la prueba próctor estándar para obtener la máxima densidad específica y la humedad óptima de compactación aplicable a todos los métodos de ensayo. En segundo lugar, se determinaron los tratamientos de cada ensayo los cuales se montaron en un permeámetro de carga constante para determinar el coeficiente de permeabilidad (k) del suelo. Las determinaciones de permeabilidad; se efectuaron en dos etapas para medir el efecto de los tratamientos a través del tiempo. Después de realizar las mediciones, por un lapso de siete meses, se analizaron los datos con el Software R para obtener los tratamientos con la menor permeabilidad. Con base en los resultados obtenidos, se realizó un análisis económico que consistió en la comparación de los precios unitarios de los tratamientos efectivos ($k < 0.864$ mm día⁻¹) contra el precio de la geomembrana, finalmente se seleccionó el mejor tratamiento con respecto a su costo unitario y permeabilidad (Diagrama 1).

Diagrama 1. Metodología para identificar los mejores tratamientos en el control de la permeabilidad.



6.3.1. Determinación de las propiedades físico-químicas y mecánicas del suelo

Las propiedades físicas, químicas analizadas fueron: ensayo granulométrico, textura, límites de Atterberg (límite líquido (LL), límite plástico(LP) e índice de plasticidad (IP)), materia orgánica, arofana, pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), determinación de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+}), difracción de rayos X y estimación de la proporción suelo-cal. Como propiedad mecánica se realizó la compactación próctor estándar. Por último, se midió el coeficiente de permeabilidad del suelo.

6.3.1.1. Ensayo granulométrico

La distribución del tamaño de partículas se realizó en muestras de 500 g (peso seco). Se utilizaron diez tamices con aberturas de 12.7, 6.36, 4.76, 3.36, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.15 y 0.074 mm, el tiempo de agitación fue de 5 minutos para cada muestra, para ello se registró el peso del material retenido en cada tamiz (Figura 12 y Figura 13). Para cada diámetro se calculó la proporción de peso retenido con respecto al peso total de la muestra.



Figura 12. Juego de tamices para ensayo granulométrico.

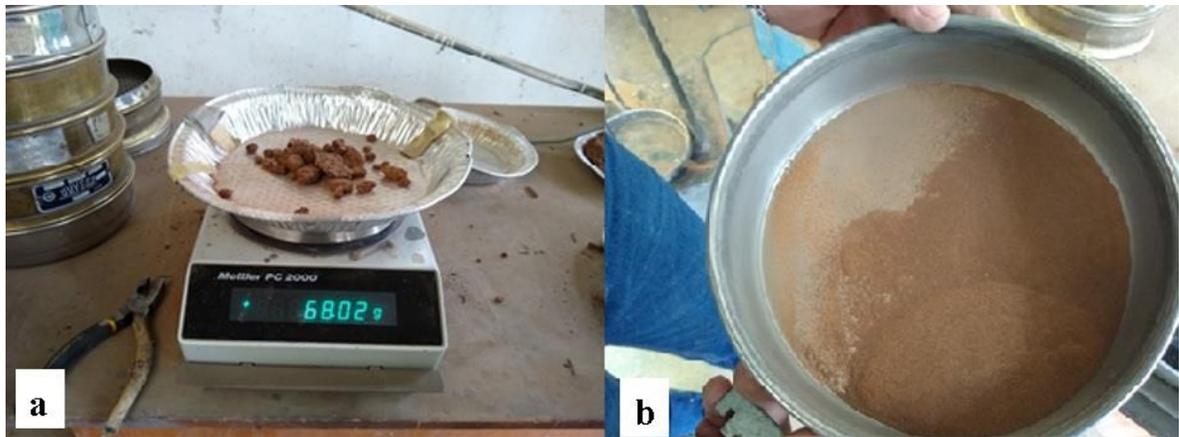


Figura 13. a) peso del suelo retenido; b) suelo retenido en malla.

6.3.1.2. Textura

La textura se determinó con el método de Bouyoucos modificado (Figura 14), con 50 g de suelo tamizado en malla #200 (0.074 mm) aplicando el método AS-09 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El resultado se corroboró con la determinación del análisis del tamaño de partículas del suelo con el procedimiento de la pipeta detallada por el método AS-28 de la norma anterior en el cual se eliminó primeramente la materia orgánica en una muestra de 80 g de suelo.



Figura 14. Determinación de textura método de Bouyoucos modificado.

6.3.1.3. Ensayo límites de Atterberg

Los límites de Atterberg se calcularon sobre una muestra tamizada en malla # 10 (2 mm), mediante el método de la copa de Casagrande (Figura 15) tomando en cuenta la norma (ASTM D4318-05, 2005), utilizando la ecuación 5.

$$LL = \frac{H}{1.419 - 0.3 \text{ Log } (N)} \dots \dots \dots 5$$

Dónde:

LL = Límite líquido

H = Humedad(%)

N = Número de golpes necesarios para el cierre de muestra, procurando que esté comprendido entre 20 y 30.

El contenido de humedad del suelo por gravimetría se determinó con el método AS-05 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) con la ecuación 6.

$$w = \frac{(Mh - Ms)}{(Ms - Mr)} * 100 \dots \dots \dots 6$$

Dónde:

w = Límite líquido

Mh = Peso del recipiente más la muestra del suelo húmedo

Ms = Peso recipiente más la muestra seca

Mr = Peso del recipiente

$IP = LL - LP$

Donde: IP = índice plástico; LL = Límite líquido; LP = límite plástico

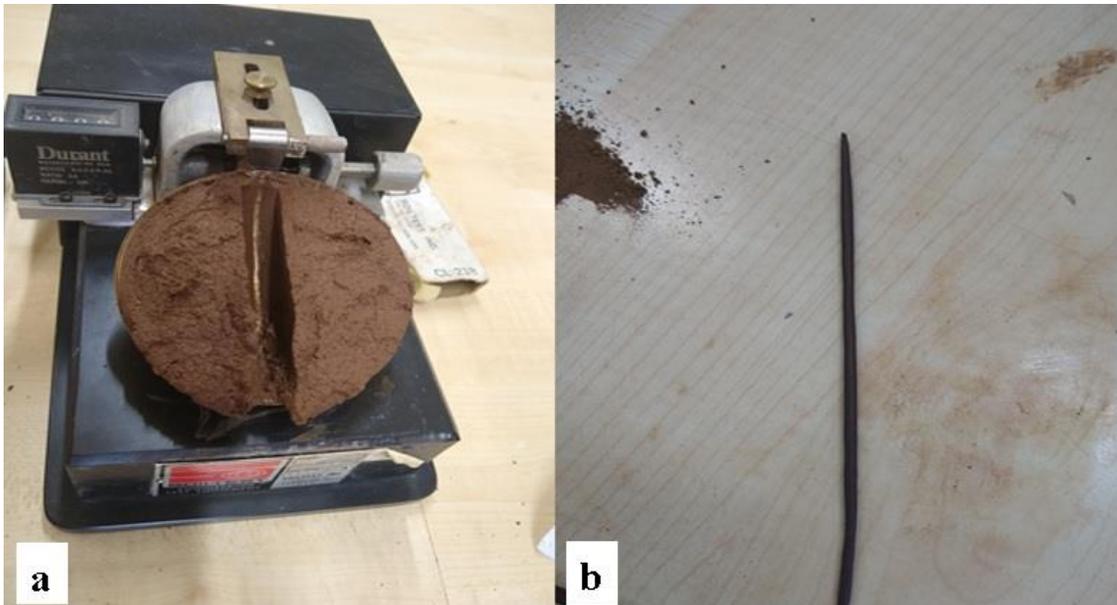


Figura 15. a) Determinación del límite líquido; b) Determinación del límite plástico.

6.3.1.4. Materia orgánica

La determinación de materia orgánica se hizo a través del contenido de carbono orgánico con el método de (Walkley y Black, 1934) que se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio como lo especifica el método AS-07 de la Norma NOM-021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Para el cálculo de la materia orgánica se utilizaron las ecuaciones 7 y 8.

$$\% \text{ C Orgánico} = \left(\frac{B - T}{g} \right) \times (N) \times (0.39) mcf \dots \dots \dots 7$$

Donde:

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (mL)

T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (mL)

N = Normalidad exacta del sulfato ferroso

g = Peso de la muestra empleada (g)

mcf = facto de corrección de humedad

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724 \dots \dots \dots 8$$

6.3.1.5. Determinación de alófana

Para determinar la presencia de alófana, se utilizó el fluoruro de sodio (Fieldes y Perrot, 1966).

6.3.1.6. pH

El pH se determinó con un potenciómetro (Figura 16), utilizando 10 g de suelo tamizado en malla número 10 (2mm), la relación suelo: agua fue de 1:2 a través del método AS-24 de la Norma NOM-021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).



Figura 16. Medición del pH.

6.3.1.7. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se determinó con un conductímetro en una muestra de 10 g tamizada en malla # 10 (2 mm) con el extracto de saturación a través del método AS-18 de la Norma NOM-021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

6.3.1.8. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La determinación de la CIC se realizó con el método de acetato de amonio descrito en (Chapman, 1965) y también se desarrolla en la Norma Oficial Mexicana NOM-021 RECNAT-2000. El suelo se tamizó en malla # 10 (2 mm), se tomó 5 g y se colocó en un frasco de 100 mL, se hicieron tres lavados con acetato de amonio (33 mL de solución por lavado), el líquido resultante de los tres lavados se decantó en un matraz de 100 mL (se aforó con acetato de amonio), se filtró y se guardó para la posterior determinación de las bases intercambiables (Figura 17a).

Enseguida se hicieron dos lavados con cloruro de amonio (1N y 0.25N respectivamente) desechando el sobrante. Luego, se hicieron 6 lavados con alcohol. En cada procedimiento se agitó por 10 minutos y se centrifugaron por el mismo tiempo. Una vez finalizado el lavado con alcohol, se realizó la prueba de cloruros con 5 gotas de nitrato de plata (Figura 17b), los lavados con alcohol se continuaron hasta que la prueba resultó negativa.



Figura 17. a) Filtrado para determinación de bases intercambiables; b) Prueba de cloruros.

Finalmente, se hicieron tres lavados con cloruro de sodio al 10% (33 mL cada lavado), agitando durante 10 minutos y centrifugando cada vez, la solución se decantó en un matraz volumétrico de 100 mL y se completó el volumen. Para determinar el amonio se tomó 20 mL de alícuota y se le agregaron 15 mL de hidróxido de sodio al 10N, esta solución se transfirió a un matraz kjeldahl de

300 mL y se conectó al aparato de destilación (Figura 18). Por último, se recogió el producto de destilación en un matraz Erlenmeyer que contenía 10 mL de ácido bórico al 2% y 10 gotas de indicador, esto se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.5N (Figura 19).



Figura 18. Aparato de destilación para determinar CIC.



Figura 19. Titulación con ácido sulfúrico para determinar CIC.

La CIC se determinó con las ecuaciones 9 y 10.

$$CIC = 200(V)(N) \dots \dots \dots 9$$

Donde:

CIC = capacidad de intercambio catiónico en $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$

V = volumen (mL) de ácido empleado al titular lo destilado en la solución borada.

N = normalidad del ácido empleado al titular

$$200 = \frac{100}{\text{alícuota}} \times \frac{100}{\text{peso de suelo}} \dots \dots \dots 10$$

6.3.1.9. Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

El PSI, se determinó cuantificando el sodio intercambiable en la solución que resultó al aplicar el método AS-12, con acetato de amonio, publicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). La ecuación 11 para su cálculo se detalla en el método AS-21 de la norma mencionada anteriormente.

$$\text{Porcentaje de Sodio Intercambiable} = \frac{N_{ai}}{CIC} \times 100 \dots \dots \dots 11$$

Donde:

N_{ai} = sodio intercambiable en $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$

CIC = capacidad de intercambio catiónico en $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$

6.3.1.10. Bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+)

La determinación de bases intercambiables se realizó con el uso del flamómetro (Figura 20) descrito por (Toth, 1949). El método utilizado también se detalla en la Norma NOM-021 RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).



Figura 20. Determinación de sodio y potasio por flamometría.

6.3.1.11. Identificación de arcillas (Difracción de rayos X)

Para la identificación de las arcillas se utilizó 50 g de suelo tamizado en malla #10 (2 mm). El procedimiento consistió en utilizar las propiedades de los rayos X y aplicar una serie de tratamientos al suelo descritos por (Kunze y Dixon, 1986) que también se encuentran en la Norma (NOM-021 RECNAT-2000, 2002). El análisis se llevó a cabo en el Laboratorio “Génesis” perteneciente al Postgrado de Edafología del Colegio de Postgraduados.

El tratamiento consistió en varios pasos: el primero fue eliminar la materia orgánica con peróxido de hidrógeno al 30%, este procedimiento se repitió tres veces (Figura 21a y Figura 21b). El segundo paso fue verificar la presencia de carbonatos (Figura 21c), la cual resultó negativa. Como tercer paso, se eliminaron los óxidos de hierro, aplicando 50 mL de citrato de sodio 0.5 molar (Figura 22). La disgregación de las partículas de la muestra y la de floculación de coloides se realizó por agitación mecánica usando hexametáfosfato de sodio como dispersante. La muestra agitada se dejó reposar 15 minutos y las arcillas se separaron con un sifón, el cual se sumergió a menos de 20 cm de la superficie de la columna de sedimentación, se hicieron extracciones sucesivas hasta que el sobrenadante quedó claro.

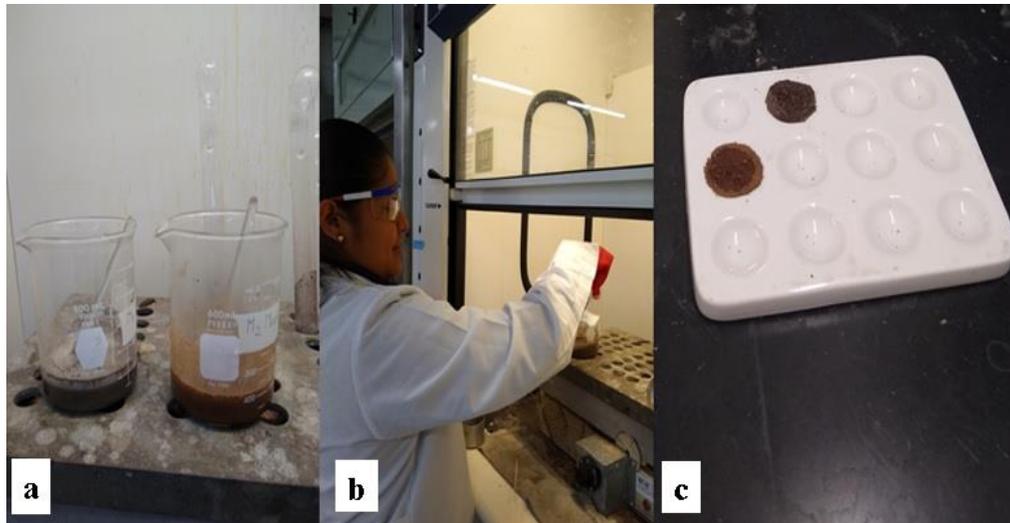


Figura 21. a) y b) Eliminación de materia orgánica en la campana de extracción; c) Prueba de carbonatos.

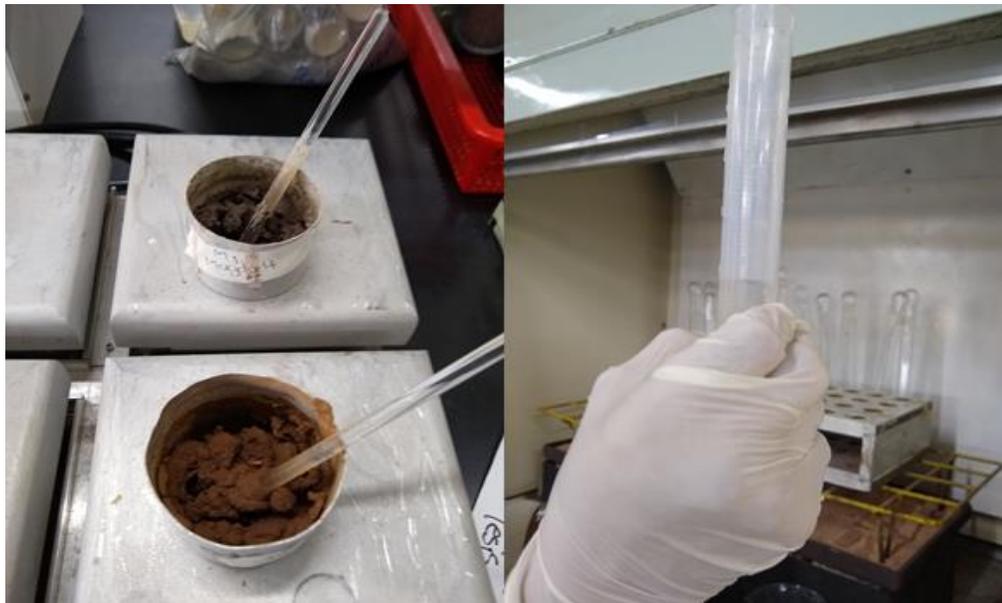


Figura 22. Eliminación de óxidos de hierro.

Una vez separadas las arcillas, se eliminó el exceso de agua, para ello se centrifugaron y se decantaron (se obtuvo una muestra aproximada de 35 mL) de la cual se tomó una alícuota para el montaje en húmedo (Figura 23a y Figura 23b). El montaje se hizo sobre portaobjetos, se secaron al aire libre (dos repeticiones). Finalmente, la identificación se hizo colocando las muestras en el Difractómetro de rayos x marca Spellman, modelo MMA DF3 (CAT N° 8501693) aplicando el

rayo X sobre la superficie (Figura 24), la energía utilizada fue 35 kwatts, 28.4 mA, el ángulo de barrido fue de 3.5 a 25. El difractograma se obtuvo con el software Visual XRD 122D con licencia del Colegio de Postgraduados.

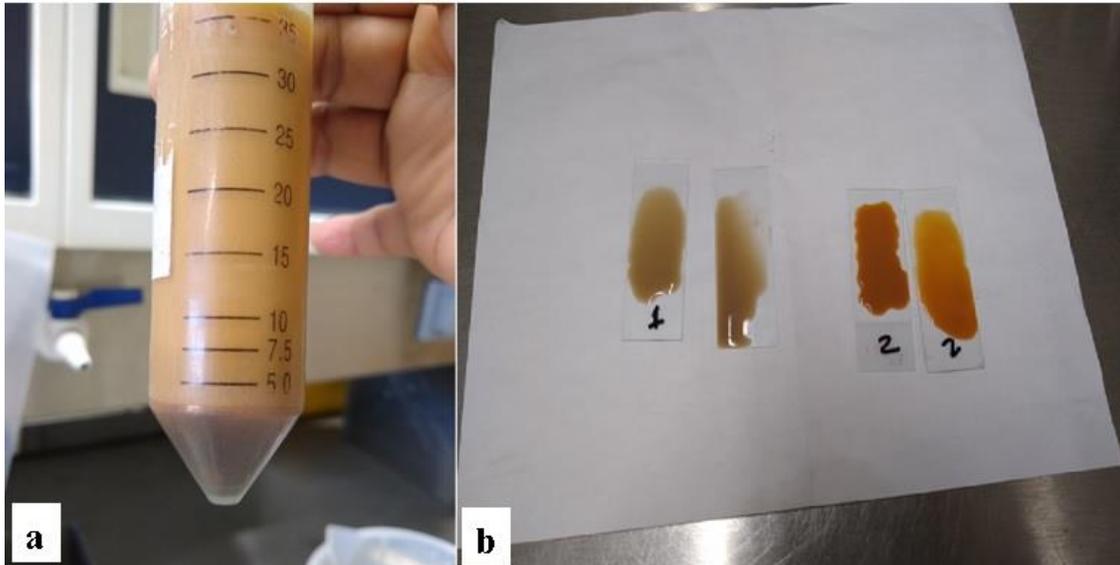


Figura 23. a) muestra final de la separación de arcilla; b) montaje en húmedo de la arcilla.



Figura 24. Equipo de difracción de rayos X.

6.3.1.12. Estimación de la proporción suelo-cal usando el método del pH.

Para determinar el porcentaje óptimo de cal, se prepararon una serie de muestras con suelo-cal, variando porcentajes de cal (Figura 25a), adicionado una muestra de 25g de suelo en todos y la misma cantidad de agua (100ml), se agitaron durante 10 minutos y posteriormente se midió el pH en cada una de ellas (Figura 25b) y también en la mezcla cal con agua. El procedimiento se realizó conforme la norma ASTM D6276-19. El suelo utilizado se pasó por el tamiz n° 40 (0.42 mm), la temperatura se fijó en 25 °C.

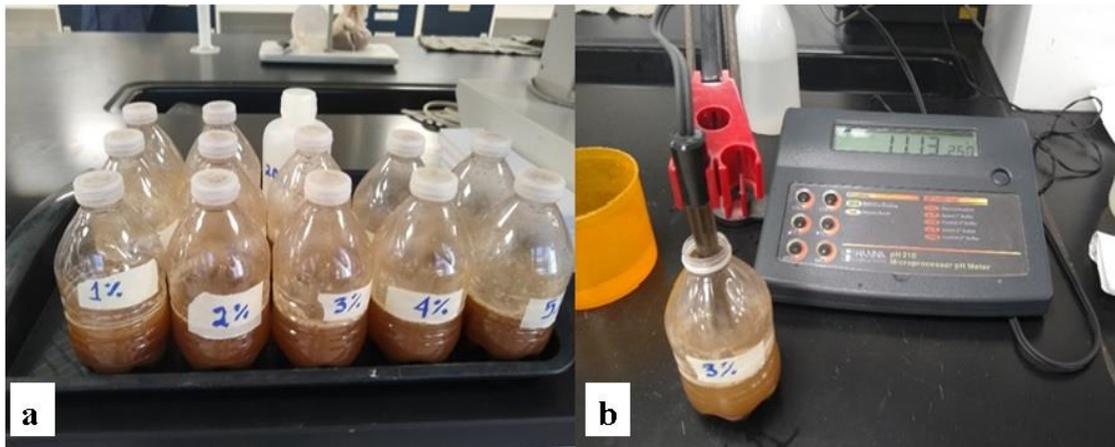


Figura 25. a) Preparación de especímenes con diferentes porcentajes de cal; b) Medición de pH.

6.3.1.13. Ensayo de compactación próctor estándar

El ensayo se realizó aplicando el método A de la norma (ASTM D698-12e2, 2012). El suelo se tamizó en malla # 4 (4.76 mm), utilizando un molde de 4 pulgadas (101.6 mm), se compactó en tres capas, con 25 golpes por capa, el pisón utilizado fue de 5.5 lbf (24.4 N) que cayó a una altura de 12 pulgadas (305 mm), produciendo una energía de compactación de 12,400 pie-lbf pies³=600 kN-m m³(Figura 26).



Figura 26. Prueba de compactación próctor estándar.

6.3.2. Dosis de tratamientos

Se analizaron 11 métodos y un testigo. En total, 46 tratamientos con 4 repeticiones cada uno (Cuadro 12), dando un total de 184 réplicas, los cuales se homogenizaron, se secaron al aire y se pasaron por el tamiz #4 (4.76 mm) como se especifica en la norma (ASTM D698-12e2, 2012). Los tratamientos del 1 al 44 se compactaron conforme a valores de humedad y densidad específica obtenidos de la prueba próctor. Cada ensayo se realizó en moldes de PVC de 3 pulgadas (75 mm), con un espesor de suelo de 15 cm. A continuación, se desglosa la dosis obtenida en cada uno de los métodos de sellado con sus respectivos tratamientos.

6.3.2.1. Gleyzación

Cada ensayo se realizó en moldes de PVC de 3 pulgadas de diámetro y 20 cm de longitud, dentro del cual se colocó una capa de suelo de 5cm en el fondo, seguido por la capa de estiércol fresco porcino, paja y 5 cm de suelo (Nicholaichuk, 1978). La dosis de aplicación de paja y estiércol se muestra en el Cuadro 4 y el esquema en la Figura 27.

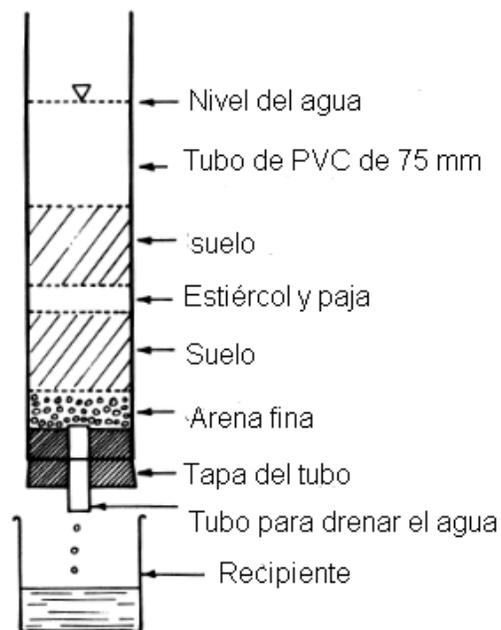


Figura 27. Esquema del tratamiento del método de sellado Gleyzación.
Fuente: Nicholaichuk (1978).

Cuadro 4. Dosis de aplicación para el método de sellado Gleyzación.

Trata- miento	Paja		Estiércol(cm)	Número de repeticiones
	kg m ⁻²	g		
T1	2.5	10	2.5	4
T2	5	20	3	4
T3	7.5	30	3.5	4
T4	10	40	4	4

6.3.2.2. Aplicación de dispersantes

La preparación / acomodo y espesor de los materiales en cada tratamiento se especifica en la Figura 28. El procedimiento consistió en tamizar el suelo en malla número 4 (4.76 mm), se pesó, se agregó el dispersante, agua hasta alcanzar el 12% de humedad óptima y se mezcló perfectamente, para después compactarlo hasta por lo menos 85% de la densidad obtenida de la prueba proctor. Los datos de seguridad de los dispersantes se muestran en el Anexo 2.

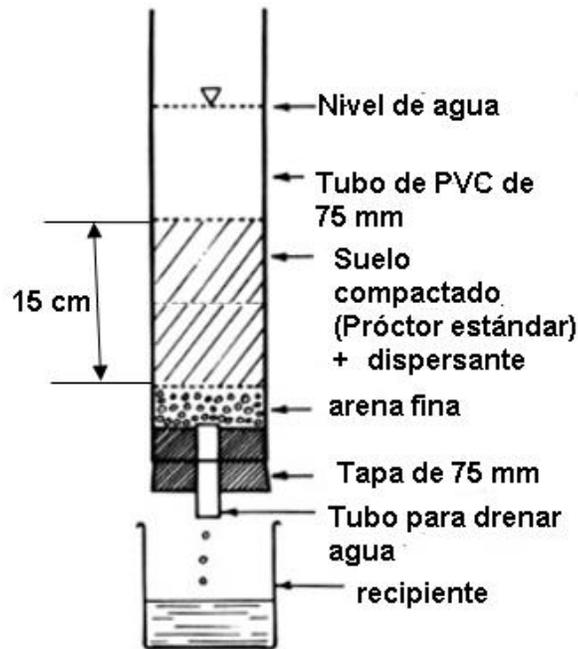


Figura 28. Esquema de los tratamientos con dispersantes.

En las dosis de tratamientos con dispersantes de partículas (Cuadro 7), primero se obtuvo el peso molecular (PM) de cada dispersante en $g\ mol^{-1}$ (Cuadro 6) para posteriormente multiplicarlo por la cantidad de sodio que retiene el suelo en $g\ kg^{-1}$ (Ecuación 12), el resultado se dividió entre el PM del sodio ($g\ mol^{-1}$). La cantidad de sodio que retiene el suelo se obtuvo multiplicando la CIC ($12\ cmol_+ kg^{-1}$) por el PM del sodio (Cuadro 5). Con estos datos se obtuvieron gramos de dispersantes por cada kilogramo de suelo (Ecuación 13) que se utilizaron como referencia para la dosis final de cada uno de los tratamientos.

$$Cantidad\ dispersante\ (g\ kg^{-1}) = \frac{PM_{dispersante} \times Na^+ \text{ retiene el suelo}}{PMNa^+} \dots\dots\dots 12$$

$$Na^+ \text{ retiene el suelo} (g\ kg^{-1}) = \frac{PMNa^+ \times CIC}{100} \dots\dots\dots 13$$

Cuadro 5. Resultados de la CIC y sodio en el suelo

Concepto	valor	unidad
CIC	12.00	cmol _c kg ⁻¹
Peso molecular del sodio (Na ⁺)	23	g mol ⁻¹
Cantidad de sodio que puede retener el suelo (Na ⁺)	2.76	g kg ⁻¹

Cuadro 6. Cantidad de dispersante por cada kilogramo de suelo.

N°	Dispersante	Fórmula química	Peso molecular (g mol ⁻¹)	Cantidad (g kg ⁻¹) de suelo
1	Carbonato de sodio	Na_2CO_3	105.99	6.4
2	Tripolifosfato de sodio	$Na_5O_{10}P_3$	367.86	8.8
3	Fosfato de sodio	Na_3PO_4	163.94	6.6
4	Silicato de sodio	Na_2SiO_3	122.06	7.3
5	Cloruro de sodio	$NaCl$	58.44	7.0
6	Hidróxido de sodio	$NaOH$	40.00	4.8

Cuadro 7. Dosis de dispersantes de partículas por cada kilogramo de suelo.

Tratamientos	Dosis dispersante (g kg ⁻¹)	*Suelo (kg)	Dispersante (g)	N° de repeticiones
Carbonato de Sodio				
T5	4	0.981	3.9	4
T6	8	0.981	7.9	4
T7	12	0.981	11.8	4
T8	16	0.981	15.7	4
T9	20	0.981	19.6	4
Tripolifosfato de Sodio				
T10	6	0.981	5.9	4
T11	10	0.981	9.8	4
T12	14	0.981	13.7	4
T13	18	0.981	17.7	4
T14	22	0.981	21.6	4
Fosfato de Sodio				
T15	8	0.981	7.9	4
T16	10	0.981	9.8	4
T17	12	0.981	11.8	4
T18	16	0.981	15.7	4
T19	20	0.981	19.6	4
Silicato de Sodio				
T20	6	0.981	5.9	4
T21	8	0.981	7.9	4
T22	12	0.981	11.8	4
T23	16	0.981	15.7	4
T24	20	0.981	19.6	4
Cloruro de Sodio				
T25	8	0.981	7.9	4
T26	12	0.981	11.8	4
T27	16	0.981	15.7	4
T28	20	0.981	19.6	4
Hidróxido de Sodio				
T29	4	0.981	3.9	4
T30	8	0.981	7.9	4
T31	12	0.981	11.8	4
T32	16	0.981	15.7	4

*La cantidad de suelo se determinó multiplicando la densidad específica 1.7 g cm⁻³ por el volumen del molde 577.27 cm³.

6.3.2.3.Suelo-bentonita

En los tratamientos con bentonita, el suelo fue tamizado y compactado igual que en los tratamientos anteriores, con la diferencia en la dosis de bentonita sódica, este valor se detalla en el Cuadro 8. La dosis se calculó con la recomendación proporcionada por (Pfof *et al.*, 1997) del orden de: 1 lb ft⁻² hasta 3 lb ft⁻² = (equivalente a 4.88 kg m⁻² hasta 14.64 kg m⁻²).

Cuadro 8. Cantidad de bentonita sódica.

Tratamiento	Dosis		Número de repeticiones
	kg m ⁻²	g	
T33	4	15	4
T34	8	30	4
T35	12	45	4
T36	16	60	4

6.3.2.4.Suelo-Cemento

En el sellado con cemento y arena, se hicieron pruebas preliminares, variando el porcentaje de cemento en: 6, 8, 10 y 12% y la arena en 15, 20, 25 y 30%, efectuando en un inicio todas las combinaciones posibles. Los resultados preliminares permitieron ver que tratamientos con 12% de cemento y el porcentaje más bajo de arena reducían la permeabilidad a valores cercanos a 0 mm día⁻¹ (Anexo 3) De este modo, se decidió ensayar la permeabilidad con cemento al 12% y la arena se varió en 10,12,14 y 16%. En el Cuadro 9 se muestra la dosis final de arena y cemento.

Cuadro 9. Dosis de cemento-arena por cada kilogramo de suelo.

Tratamiento	*Arena		Cemento	
	%	g	%	g
T37	10	20	12	122.4
T38	12	40	12	124.8
T39	14	60	12	127.2
T40	16	80	12	129.6

* Al kilogramo de suelo, sólo se le agregó la arena faltante, ya que el suelo contenía 8%.

6.3.2.5.Suelo-Cal

En tratamientos con cal, se determinó el porcentaje óptimo de cal según indicaciones proporcionadas por la norma ASTM D6276-4 (2019) bajo el criterio de incrementar el contenido

de cal hasta que el pH alcance un valor de 12.4; siendo esa la dosis necesaria para estabilizar el suelo (Mendoza *et al.*, 2018) por la producción de gel de sílice.

6.3.2.6. Estimación de la proporción suelo-cal usando el método del pH.

En este caso para el suelo del sitio resultó un porcentaje de 12% para un pH de 11.9 (Figura 29). Con este porcentaje de cal, usado como referencia, la dosis para los tratamientos se fijó en 6,10,14 y 18% con respecto al peso del suelo (Cuadro 10).

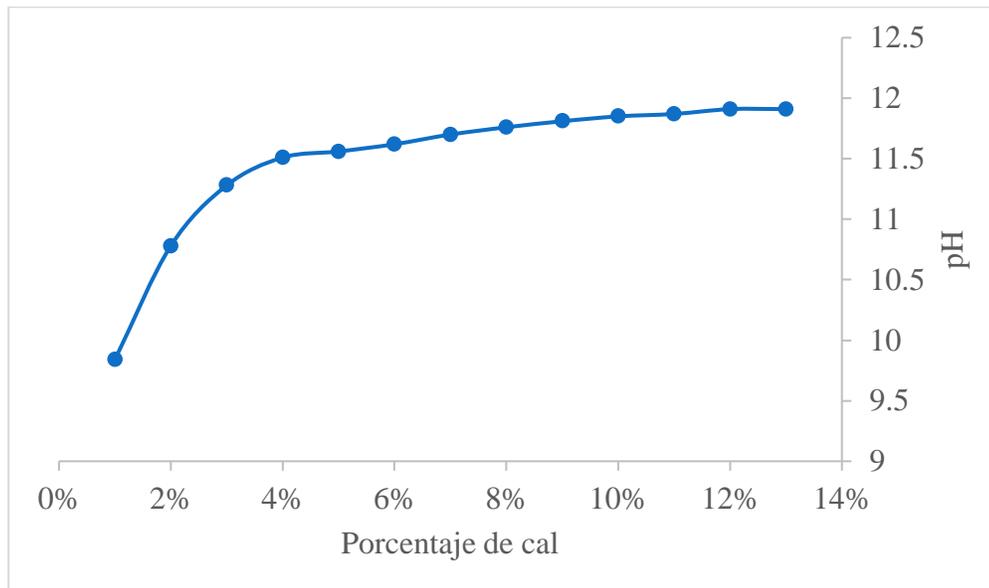


Figura 29. Variación del pH con respecto a las diferentes mezclas de suelo-cal.

Cuadro 10. Dosis de cal para la estabilización del suelo

Tratamiento	Dosis (%)	*Peso cal (g)	Nº de repeticiones
T41	6	58.88	4
T42	10	98.14	4
T43	14	137.39	4
T44	18	176.64	4

* La cantidad de cal en g se determinó multiplicando la densidad específica 1.7 g cm^{-3} por el volumen del molde 577.27 cm^3 por la dosis.

6.3.2.7. Compactación próctor estándar

En este tratamiento, el suelo se compactó a una densidad específica de 1.7 g cm^{-3} obtenida del ensayo de compactación próctor estándar. La cantidad de suelo utilizado se muestra en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Suelo utilizado para el tratamiento compactación próctor estándar.

Área del molde (cm^2)	Altura molde (cm)	Volumen molde (cm^3)	Densidad aparente (g cm^{-3})	Suelo (g)
38.48	15	577.27	1.70	981.36

6.3.2.8. Muestra inalterada (testigo)

Este tratamiento consistió en tomar una muestra de suelo inalterada del sitio de estudio y se determinó el coeficiente de permeabilidad con el permeámetro de carga constante.

6.3.3. Resumen de la dosis de tratamientos

En el Cuadro 12 se presenta un resumen de las dosis utilizadas en cada uno de los tratamientos.

Cuadro 12. Resumen de los tratamientos evaluados.

N°	Métodos de sellado	Tto	Dosis de aplicación	R	N°	Métodos de sellado	Tto	Dosis de aplicación	R
1	Gleyzación (g paja y cm estiércol)	T1	10, 2.5	4	6	Cloruro de sodio (g kg ⁻¹)	T25	8	4
		T2	20, 3.0	4			T26	12	4
		T3	30, 3.5	4			T27	16	4
		T4	40, 4.0	4			T28	<u>20</u>	4
		T5	6	4			T29	4	4
2	Carbonato de sodio (g kg ⁻¹)	T6	8	4	7	Hidróxido de sodio (g kg ⁻¹)	T30	8	4
		T7	12	4			T31	12	4
		T8	16	4			T32	<u>16</u>	4
		T9	<u>20</u>	4			T33	15	4
		T10	6	4			T34	31	4
3	Tripolifosfato de sodio (g kg ⁻¹)	T11	10	4	8	Bentonita sódica (g kg ⁻¹)	T35	46	4
		T12	14	4			T36	<u>62</u>	4
		T13	18	4			T37	10%	4
		T14	<u>22</u>	4			T38	12%	4
		T15	8	4			T39	14%	4
4	Fosfato de sodio (g kg ⁻¹)	T16	10	4	9	Cemento (12%) y arena(%)	T40	<u>16%</u>	4
		T17	12	4			T43	6%	4
		T18	16	4			T42	10%	4
		T19	<u>20</u>	4			T43	14%	4
		T20	6	4			T44	18%	4
5	Silicato de sodio (g kg ⁻¹)	T21	8	4	10	Cal hidratada (%)	T45	Prueba Próctor	4
		T22	12	4			T45	Prueba Próctor	4
		T23	16	4			T46	Muestra inalterada	4
		T24	<u>20</u>	4			Total		184

*Tto= Tratamientos y R= repeticiones.

6.4.Determinación del coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad se calculó a saturación en condiciones de laboratorio, utilizando el método del permeámetro de carga constante que tiene su principio en la Ley de Darcy, expresada en la Ecuación 14.

$$k = \frac{VL}{Ath} \dots \dots \dots 14$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad (m dia^{-1})

A = área de la sección transversal de la muestra (m^2)

h = Carga constante de agua (m)

V = Volumen del flujo (m^3)

t = Tiempo de ensayo (día)

L = Longitud de la columna de suelo (m)

La determinación de la permeabilidad consistió en tres etapas: la primera fue la preparación de la muestra, enseguida el montaje de muestras al permeámetro de carga constante y la última es la medición del coeficiente de permeabilidad del suelo.

6.4.1. Preparación de la muestra

La preparación de las muestras consistió en saturarlas durante un lapso de dos días (Figura 30). Después de la saturación, se procedió a colocar una malla mosquitera en la parte superior de la muestra con el objetivo de evitar el daño de la estructura del suelo por el derrame del agua en el permeámetro.



Figura 30. Hidratación de muestras.

6.4.2. Montaje de la muestra

Se les colocó un tapón de hule de 3 pulgadas en la parte inferior de la muestra y se fijó al cilindro con una abrazadera #52, cuyo objetivo fue servir de soporte al núcleo del suelo contenido en el

cilindro y también permitir la salida del flujo. En la parte superior de la muestra también se colocó otro tapón de hule y se fijó con dos abrazaderas del mismo número, finalmente se fijaron con un alambre a la pared. Enseguida, se conectaron a las mangueras de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro al permeámetro que se encontraba con agua potable (Figura 31). La cabeza de agua se mantenía constante, haciendo uso de una válvula de $\frac{1}{4}$ de pulgada para eliminar el aire y exceso de agua. La alimentación al tanque de agua constante se hacía desde otro recipiente del mismo tamaño con una carga mayor. Para controlar la carga constante se utilizó una válvula de auto rellenado



Figura 31. Montaje de muestras al permeámetro de carga constante

6.4.3. Evaluación del coeficiente de permeabilidad

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad, se diseñó un permeámetro con una carga constante de ocho metros para ensayar ocho muestras simultáneamente (Figura 32). Cuando las muestras se encontraban conectadas en el permeámetro, se abría una válvula de $\frac{1}{4}$ de pulgada que controlaba ocho muestras y el agua que pasaba por la columna se recolectaba en un recipiente con tapa para evitar las pérdidas por evaporación, después se medía el agua en una probeta. Para realizar la medición, se dejaba que la muestra se estabilizara en un lapso de 12 horas y enseguida

se realizaba la medición en periodos de 3 y 6 horas o dependiendo de los tratamientos; algunos necesitaban más tiempo, se dejaba de medir hasta que el volumen resultara constante.

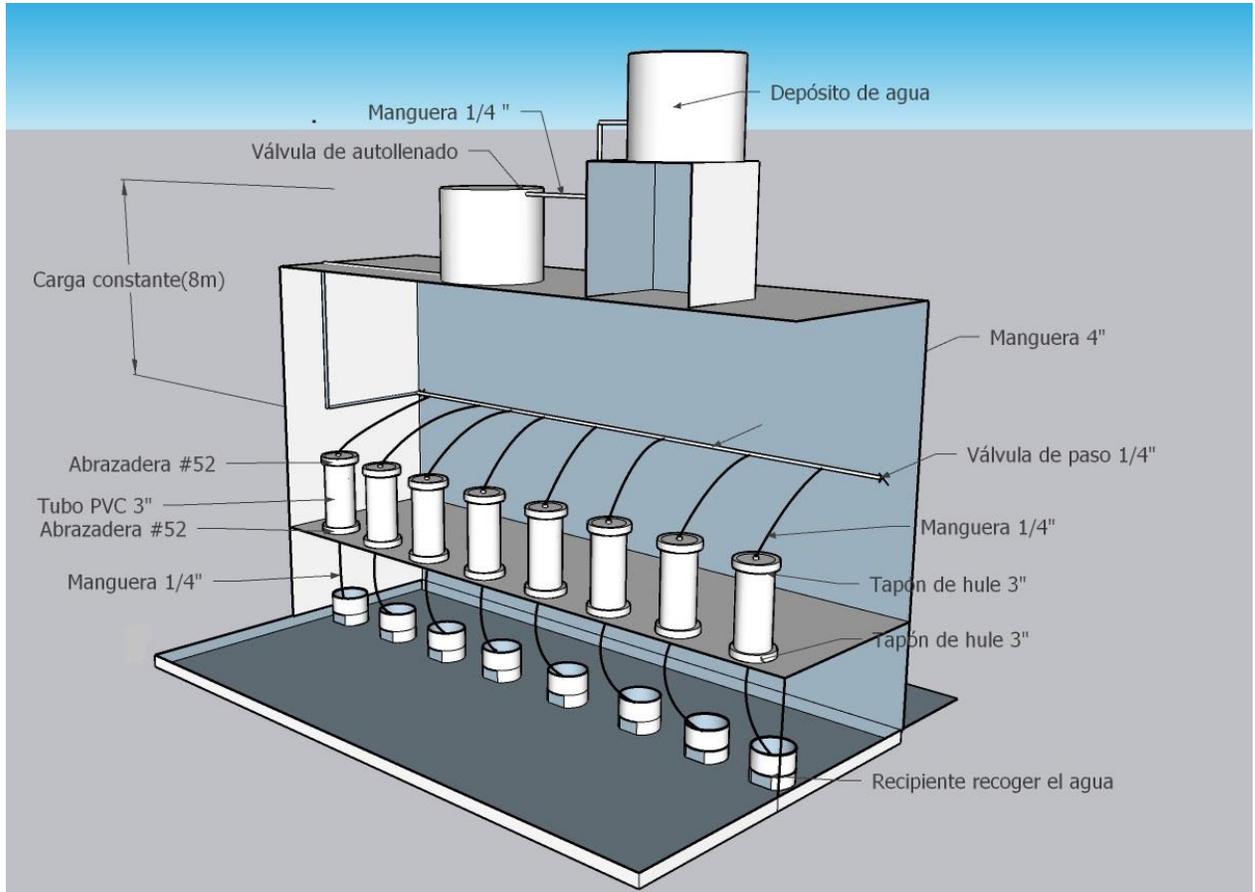


Figura 32. Permeámetro de carga constante.

6.5. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados de permeabilidad, se utilizó el Diseño Experimental Completamente al Azar (DECA), en el que los tratamientos se asignan al azar a las Unidades Experimentales (UE). Dicha asignación aleatoria debe ser a UE's homogéneas, debido a que se pretende medir solamente el efecto de la aplicación de un tratamiento determinado. Una forma eficiente para realizar la aleatorización es usando el paquete estadístico "R". En el presente trabajo se realizó un experimento completamente aleatorizado con 46 tratamientos y cuatro repeticiones.

Modelo estadístico DECA

Se refiere a la forma de representar el valor de la variable de respuesta que es explicada por una media general, el efecto de un factor en estudio y el efecto de otros factores (ε) que pueden ser genéticos, ambientales, etc., tal como se muestra en la Ecuación 15.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \dots \dots \dots 15$$

$i = 1, 2, \dots, t$; $j = 1, 2, \dots, r$; $t =$ número de tratamientos, $r =$ número de repeticiones

Y_{ij} = la variable aleatoria correspondiente al tratamiento i en su repetición j

μ = media general

τ_i = efecto del tratamiento i

ε_{ij} = error experimental correspondiente al tratamiento i en su repetición j

El modelo supone que las variables aleatorias con independientes e idénticamente distribuidas y tienen una distribución normal o de forma equivalente (ecuación 16)

$$\varepsilon_{ij} \sim NIID(0, \sigma^2) \dots \dots \dots 16$$

Si estos supuestos se cumplen se pueden realizar pruebas de hipótesis respecto a los parámetros, usando la metodología descrita como Análisis de Varianza (ANDEVA) por lo que será muy importante verificar dichos supuestos que son: normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia.

6.5.1. Análisis de varianza(ANDEVA)

El procedimiento correcto para probar la igualdad de varias medias es el análisis de varianza (Montgomery, 2004). El análisis de varianza consiste en tener a tratamientos o niveles diferentes de un solo factor que quieren compararse. La respuesta observada de cada uno de los a tratamientos es una variable aleatoria.

En este caso, se desea encontrar si los métodos de sellado en conjunto con la prueba próctor y la muestra inalterada afectan el coeficiente de permeabilidad del suelo. Se utilizará el análisis de varianza para probar $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_4$ contra la hipótesis alternativa H_1 : algunas medias son diferentes.

6.5.2. Comparación de medias

Se utilizó el método LSD o t-Fisher para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores, controlando al mismo tiempo la tasa de error individual en un nivel especificado.

Prueba LSD O t-Fisher

El primer paso es encontrar los promedios de los tratamientos y ordenarlos en forma no creciente. El segundo paso es calcular la diferencia mínima significativa con las ecuaciones 15 y 16.

$$DMS = tS_{\bar{y}} \dots \dots \dots 15$$

donde:

$t = t -$ tablas de la $t -$ student con $GL(E)$ grados de libertad y un área derecha $\alpha/2$

$$S_{\bar{y}} = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{2CM(E)}{r}}, \text{ para el caso balanceado} \\ \sqrt{CM(E) \left[\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \right]}, \text{ para el caso desbalanceado} \end{array} \right\} \dots \dots \dots 16$$

El paso tres, es la comparación por pares y decisión como lo muestra la ecuación 17.

$$Si |\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > DMS \rightarrow \tau_i \neq \tau_j \dots \dots \dots 17$$

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, primero se muestran las determinaciones físicas, químicas y mecánicas del suelo. Como segundo lugar se desglosan resultados de la evaporación e infiltración del sitio de estudio y por último se muestran los resultados de la permeabilidad del suelo de los tratamientos evaluados.

7.1. Propiedades físicas y químicas del suelo

Los resultados de las determinaciones se muestran en el Cuadro 13. La textura del suelo residual corresponde a una arcilla con presencia de caolinita, montmorillonita, halloysita, óxidos de manganeso, hidróxido de aluminio y óxido de hierro. El pH es moderadamente ácido (SEMARNAT, 2002). La capacidad de intercambio catiónico corresponde a caolinitas según SEMARNAT (2002), el catión dominante fue el calcio. El porcentaje de sodio intercambiable (10%) es bajo, según Shainberg y Letey (1984) un aumento por arriba de 15% de sodio desintegraría las arcillas permitiendo reducir la infiltración. No existe cementación entre las partículas por presencia de carbonatos. Los límites de Atterberg indicaron la presencia de una arcilla inorgánica de baja plasticidad. La inexistencia de alofana indica un suelo muy meteorizado (Fisher y Schmincke, 1984). El porcentaje de materia orgánica es bajo según SEMARNAT (2002) y la conductividad eléctrica reporta efectos despreciables de salinidad (SEMARNAT, 2002).

Cuadro 13. Características físicas, químicas y mecánicas del suelo.

Característica	Valor
Arena(%)	8.00
Limo(%)	36.00
Arcilla(%)	56.00
Densidad específica próctor estándar (g cm ⁻³)	1.70
Porcentaje de humedad prueba próctor estándar (%)	12
Composición mineralógica de la fracción arcilla	caolinita, montmorillonita, halloysita, bernesita, todorokita, gibbsita y hematita.
pH 1:2	6.03
Capacidad de intercambio catiónico (cmol ₊ kg ⁻¹)	12.00
Calcio (cmol ₊ kg ⁻¹)	5.15
Magnesio (cmol ₊ kg ⁻¹)	3.68
Potasio (cmol ₊ kg ⁻¹)	2.10
Sodio (cmol ₊ kg ⁻¹)	1.22
Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)	10.03
Contenido de carbonatos %	0.00
Límite líquido (LL)	42.32
Límite plástico (LP)	25.04
Índice de plasticidad (IP)	17.28
Materia orgánica (%)	1.62
Presencia de alofana	Negativo
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.46
Clasificación del suelo(SUCS)	CL(arcilla inorgánica de baja plasticidad)

7.1.1. Clase textural del suelo

La clase textural del suelo, de acuerdo a los porcentajes de arena, limo y arcilla reportados en el Cuadro 13 corresponde a una arcilla (Figura 33).

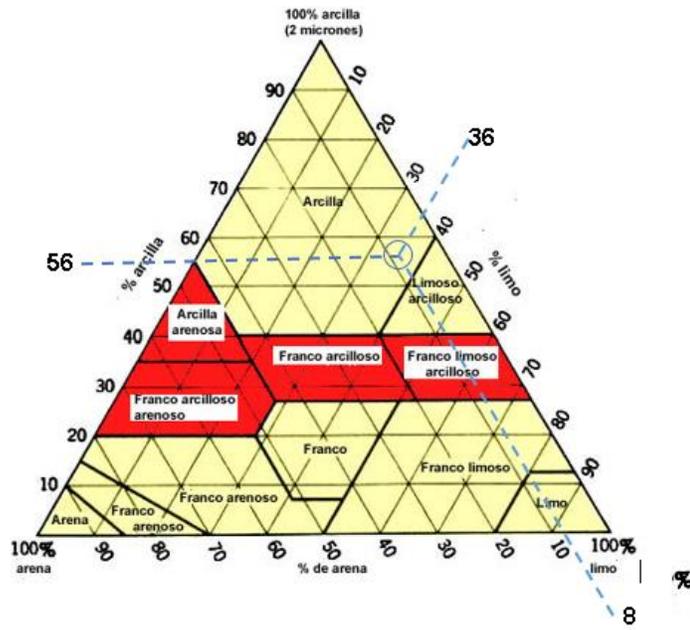


Figura 33. Clase textural del suelo utilizado.

7.1.2. Granulometría

En la Figura 34 se muestran los resultados del ensayo granulométrico realizado por tamizado para partículas grueso-granulares (gravas, arenas).

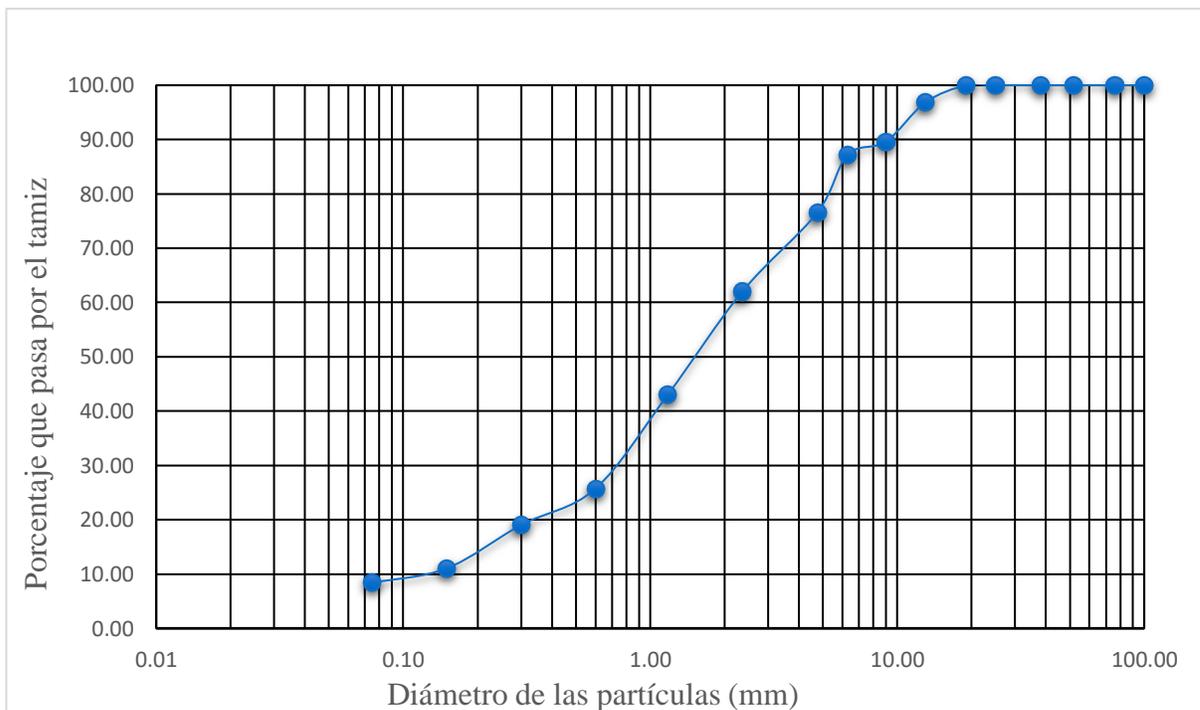


Figura 34. Curva granulométrica del suelo por tamizado.

7.1.3. Clasificación SUCS

La clasificación se hizo de acuerdo al criterio de clasificación SUCS (ASTM D2487-17e1, 2017). Con los datos de la Figura 34, el porcentaje que pasa la malla # 200 es menor al 50%(8.38%) resultando un suelo grueso (SG), la fracción que pasa la malla #4 es mayor al 50%(87.21%) obteniendo una arena de símbolo doble ubicada en el grupo II, para determinar la graduación, se obtuvo el coeficiente de uniformidad ($C_u=19.17$) y el coeficiente de contracción ($C_c=2.01$), resultando una arena bien graduada (SW) y con la carta de plasticidad de Casagrande se verificó la presencia de limos y arcillas.

Al realizar la determinación de textura en el laboratorio, se obtuvo un suelo con 56% de arcilla, para ello se rectificó en la carta de Plasticidad de Casagrande. Con la fracción fina que pasó la malla #40 se determinó el límite líquido = 42%, límite plástico = 25% e índice de plasticidad = 17% dando como resultado una arcilla de tipo CL que son definidas como arcillas inorgánicas de baja plasticidad (Figura 35). Cuando se realiza el ensayo granulométrico, el suelo se comporta como una arena con presencia de arcillas, sin embargo, con la determinación de textura corresponde a una arcilla, finalmente la clasificación corresponde a una arcilla tipo CL.

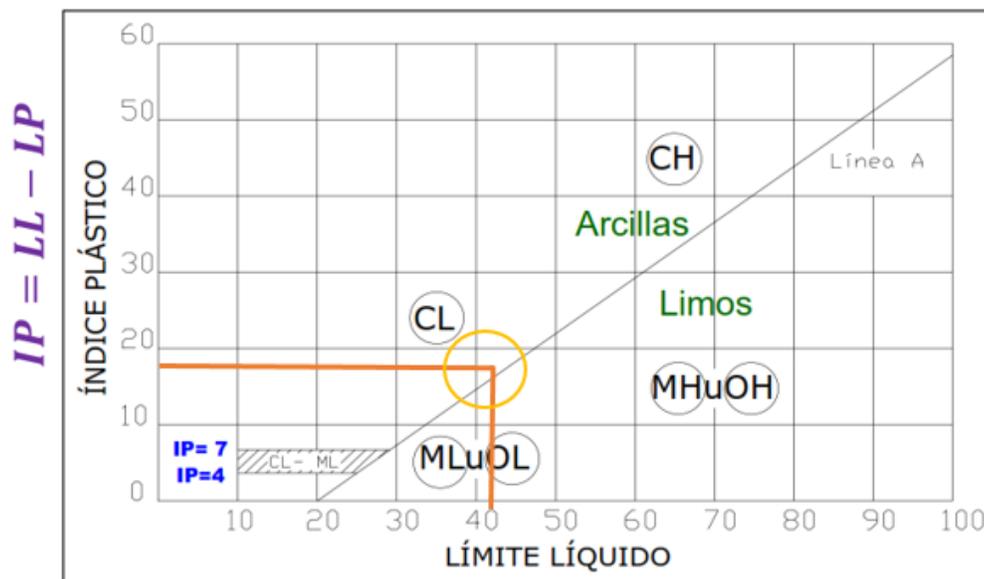


Figura 35 Clasificación de la arcilla en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

7.1.4. Identificación de la arcilla (difracción de rayos X)

En la Figura 36. Análisis elemental de arcilla en el difractor de rayos X., se observa la presencia de tres minerales arcillosos: montmorillonita, caolinita y halloysita.). La montmorillonita se identifica por presentar un pico de difracción de 1.7 a 1.8 nm (Reid-Soukup y Ulery, 2002) o $> 18 \text{ \AA}$ (Schulze, 2002).

La caolinita, en su capa tetraédrica tiene un grosor cercano a 3 \AA y la capa octaédrica cerca de 4 \AA . El espaciado “basal” típico define este mineral de 7 \AA , sus dimensiones celulares son: $c \sin \beta(001) = 7.16 \text{ \AA}$; $b = 8.93 \text{ \AA}$ (Velde, 1992).

La halloysita a temperaturas menores de $60-75^\circ\text{C}$ la deshidratación ocurre parcialmente y el espacio basal varía entre 7.36 y 7.9 \AA (Grim, 1968), en este caso se ubicó en 7.39 \AA . Al elevarse la temperatura a 400°C se alcanza la forma deshidratada de halloysita con espaciamiento basal de 7.2 \AA (Grim, 1968), en este caso no se llegó a esa temperatura.

También se observa la presencia de óxidos de manganeso: bernesita, todorokita, de igual manera la gibbsita que es un hidróxido de aluminio y la hematita que pertenece a los óxidos de hierro.

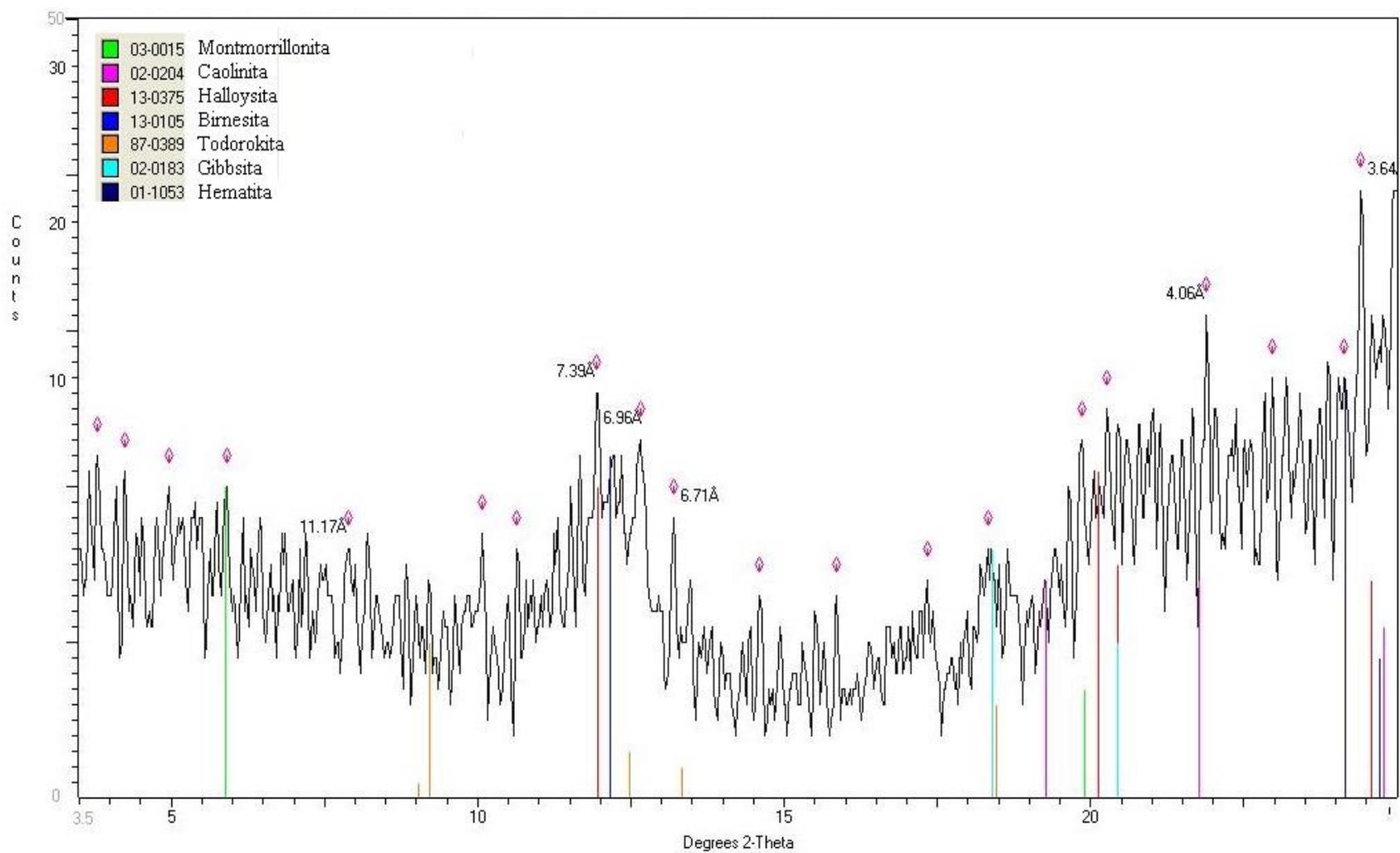


Figura 36. Análisis elemental de arcilla en el difractor de rayos X.

7.2. Propiedades mecánicas del suelo

Se muestra el resultado de la propiedad mecánica analizada que fue la prueba de compactación próctor estándar.

7.2.1. Prueba de compactación próctor estándar

Se obtuvo la curva de compactación del suelo en laboratorio, los datos se observan en el anexo 1. La densidad específica se obtuvo con 12% de humedad del suelo. El valor fue de 1.70 g cm^{-3} .

7.3. Resultados de evaporación e infiltración en el sitio de estudio

En el Cuadro 14 se muestran las pérdidas de agua por día y también se representa la pérdida anual en los meses críticos que se sitúan de noviembre al mes de abril, periodo en el que los pequeños bordos de almacenamiento contienen agua. La infiltración fue obtenida con la muestra inalterada (tratamiento 46).

Cuadro 14. Pérdidas de agua por infiltración y evaporación en el sitio de estudio.

Concepto	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Promedio
Evaporación total normal(mm)	74.1	75.5	85.5	102.4	143.2	148.3	104.83
Días del mes	30	31	31	28	31	30	30.17
Evaporación diaria (mm día ⁻¹)	2.47	2.44	2.76	3.66	4.62	4.94	3.48
Infiltración diaria (mm día ⁻¹)	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46
Pérdidas (Infiltración + evaporación) mm día ⁻¹	18.93	18.90	19.22	20.12	21.08	21.40	19.94

7.4. Resultados de las pruebas de permeabilidad de los tratamientos

En el Cuadro 15 se reportan los resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas a los tratamientos en estudio. El cálculo aplicado para obtener el coeficiente de permeabilidad por tratamiento se muestra en el Anexo 4.

Cuadro 15. Coeficiente de permeabilidad por cada tratamiento

Tratamientos	Coeficiente de permeabilidad (mm día ⁻¹)									
	Primera prueba(repeticiones)					Segunda prueba(repeticiones)				
	I	II	III	IV	Media	I	II	III	IV	Media
T1	94.71	163.70	53.69	17.02	82.28	91.21	157.15	37.32	37.32	80.75
T2	92.61	52.62	28.44	29.93	50.90	91.21	49.81	26.19	23.95	47.79
T3	13.97	18.21	15.37	8.98	14.13	11.47	14.97	14.84	5.99	11.82
T4	13.78	8.48	1.33	7.95	7.88	12.19	5.30	0.66	5.30	5.86
T5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T7	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.03	0.00	0.03	0.04	0.02
T8	0.12	0.12	0.11	0.10	0.11	0.02	0.06	0.06	0.03	0.04
T9	0.17	0.12	0.14	0.10	0.13	0.00	0.00	0.02	0.08	0.02
T10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T12.	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
T13	0.19	0.01	0.01	0.08	0.07	0.02	0.01	0.01	0.10	0.04
T14	0.25	0.00	0.03	0.03	0.08	0.11	0.00	0.09	0.00	0.05
T15	0.14	0.04	0.01	0.03	0.06	0.03	0.02	0.16	0.00	0.05
T16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T17	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01
T18	0.06	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
T19	0.06	0.02	0.05	0.01	0.04	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01
T20	0.02	0.31	0.11	0.20	0.16	0.02	0.04	0.08	0.05	0.05
T21	0.09	0.18	0.30	0.20	0.19	0.12	0.10	0.14	0.23	0.15
T22	0.15	0.15	0.14	0.50	0.23	0.05	0.00	0.16	0.36	0.14
T23	0.87	1.06	0.81	0.37	0.78	0.18	0.19	0.70	0.14	0.30
T24	0.44	0.23	0.62	0.17	0.36	0.19	0.10	0.17	0.07	0.13
T25	0.47	0.47	0.72	0.47	0.53	0.07	0.05	0.11	0.10	0.08
T26	0.31	0.37	0.31	0.62	0.41	0.06	0.09	0.00	0.05	0.05
T27	0.25	0.25	0.41	0.19	0.27	0.00	0.08	0.05	0.00	0.03
T28	0.19	0.69	0.47	0.47	0.45	0.12	0.00	0.00	0.00	0.03
T29	0.05	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
T30	0.03	0.06	0.02	0.05	0.04	0.01	0.04	0.01	0.05	0.03
T31	0.06	0.08	0.09	0.06	0.08	0.05	0.08	0.06	0.05	0.06
T32	0.08	0.06	0.09	0.20	0.11	0.10	0.06	0.12	0.12	0.10
T33	1.62	1.87	1.81	1.04	1.59	0.50	0.77	2.08	0.52	0.97
T34	0.37	1.06	2.08	1.48	1.25	0.21	3.20	0.75	0.77	1.23
T35	0.54	0.25	0.31	0.31	0.35	0.27	0.23	0.21	0.17	0.22
T36	0.08	0.10	0.21	0.39	0.20	0.10	0.04	0.10	0.23	0.12
T37	0.04	0.11	0.01	0.14	0.07	0.01	0.10	0.02	0.08	0.05
T38	0.09	0.16	0.26	0.07	0.14	0.06	0.11	0.14	0.01	0.08
T39	0.32	0.28	0.14	0.00	0.18	0.10	0.08	0.05	0.00	0.06
T40	0.20	0.22	0.16	0.19	0.19	0.09	0.07	0.11	0.05	0.08
T41	134.70	269.41	254.44	329.27	246.96	20	27	10	23	20.08
T42	179.60	209.54	269.41	329.27	246.96	7	6	21	17	12.91
T43	119.74	179.60	374.18	374.18	261.92	32	2	5	10	12.22
T44	119.74	329.27	344.24	329.27	280.63	21	6	2	6	8.61
T45	0.25	1.43	0.31	0.27	0.57	0.20	2.29	0.14	0.19	0.70
T46	16.46	10.10	12.12	14.34	13.26	16.46	10.10	12.12	14.34	13.26

7.4.1. Gleyzación

De los resultados mostrados en el Cuadro 15, en tratamientos con gleyzación, el coeficiente de permeabilidad promedio resultó superior al límite máximo permitido, de $0.864 \text{ mm día}^{-1}$, para obras de ingeniería civil (Crespo, 2004; Jaramillo 2006; USDA, 2012; FAO, 2020). En la primera prueba, el promedio de las cuatro repeticiones se situó entre 7.88 y $82.28 \text{ mm día}^{-1}$ (Figura 37). La segunda prueba se hizo 81 días después, obteniendo valores entre 5.86 y $80.75 \text{ mm día}^{-1}$. De acuerdo con la dosis, el tratamiento con menor coeficiente de permeabilidad ($K = 7.88 \text{ mm día}^{-1}$) contenía 40 g de paja y 4 cm de estiércol. Si comparamos el valor anterior con el reportado por (Nicholaichuk, 1978 (12 mm día^{-1}); Teichert-Coddington *et al.*, 1989 ($7\text{-}12 \text{ mm día}^{-1}$); McConkey *et al.*, 1990 ($48.72 \text{ mm día}^{-1}$) y Ahmad *et al.*, 1996 (30 mm día^{-1})) se encuentra entre los límites, incluso, en algunos casos es inferior; considerando que los autores dejaron el experimento por más tiempo y continuaron sus mediciones en periodos de 2-3 meses, 350 días, 1 año, 2 años y 5 años. De manera general, se observa que, a mayor dosis de paja y estiércol en el suelo, la permeabilidad se reduce, esto probablemente se relaciona con el paso del óxido ferroso a óxido férrico que en presencia de mayor cantidad de materia orgánica (paja), ausencia de suministro de oxígeno y mayor cantidad de microorganismos anaeróbicos proporciona un ambiente impermeable.

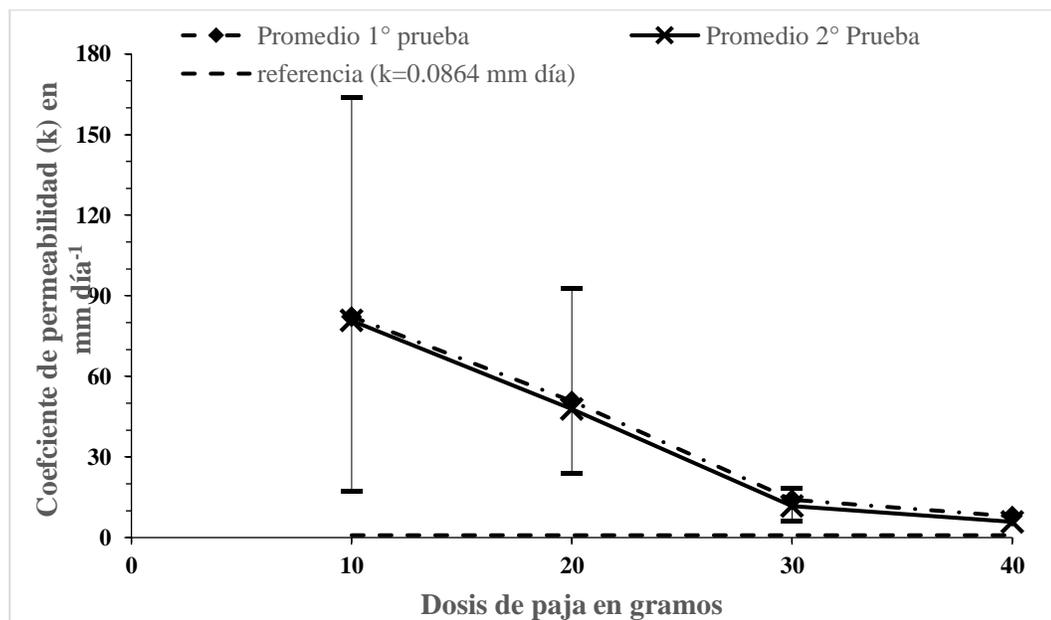


Figura 37. Coeficiente de permeabilidad (k) en gleyzación.

7.4.2. Carbonato de sodio

El carbonato de sodio demostró ser muy eficiente para el control de la infiltración, los valores medidos en la primera fase se ubicaron entre 0 y 0.13 mm día⁻¹ (Figura 38). En la segunda prueba (81 días después) los valores disminuyeron entre 0 y 0.04 mm día⁻¹, lo que muestra la efectividad del carbonato de sodio a través del tiempo. El tratamiento más efectivo fue la dosis 4 g kg⁻¹ de suelo, con valor K = 0.0 mm día⁻¹. Si se compara este valor con el máximo permitido (0.864 mm día⁻¹) es muy bajo. Lo mismo sucede con valores encontrados por (Nicholaichuk, 1978 (2.4 mm día⁻¹); Neff, 1980 (4 mm día⁻¹); Barreto *et al.*, 2003 (26.4 mm día⁻¹)) que se encuentran por arriba del valor mínimo encontrado en la investigación.

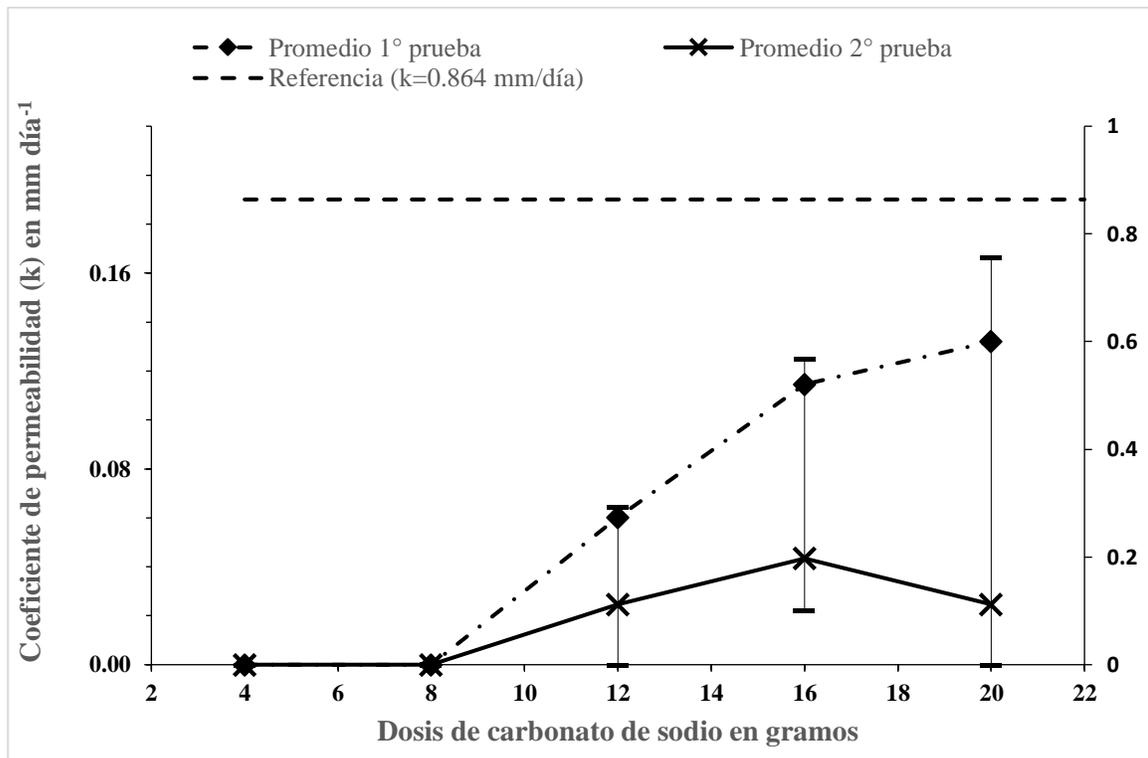


Figura 38. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con carbonato de sodio.

7.4.3. Tripolifosfato de sodio

El tripolifosfato de sodio tuvo una tendencia similar al carbonato de sodio. En la primera prueba los valores fluctuaron entre 0 y 0.08 mm día⁻¹ y 70 días después los valores de permeabilidad fueron muy similares oscilando entre 0 y 0.09 mm día⁻¹ (Figura 39). El valor promedio más eficaz

fue $K = 0 \text{ mm día}^{-1}$ con dosis de 6 y 10 gramos. Al comparar este valor, con autores mencionados anteriormente, resultó excelente al permitir un sellado totalmente impermeable.

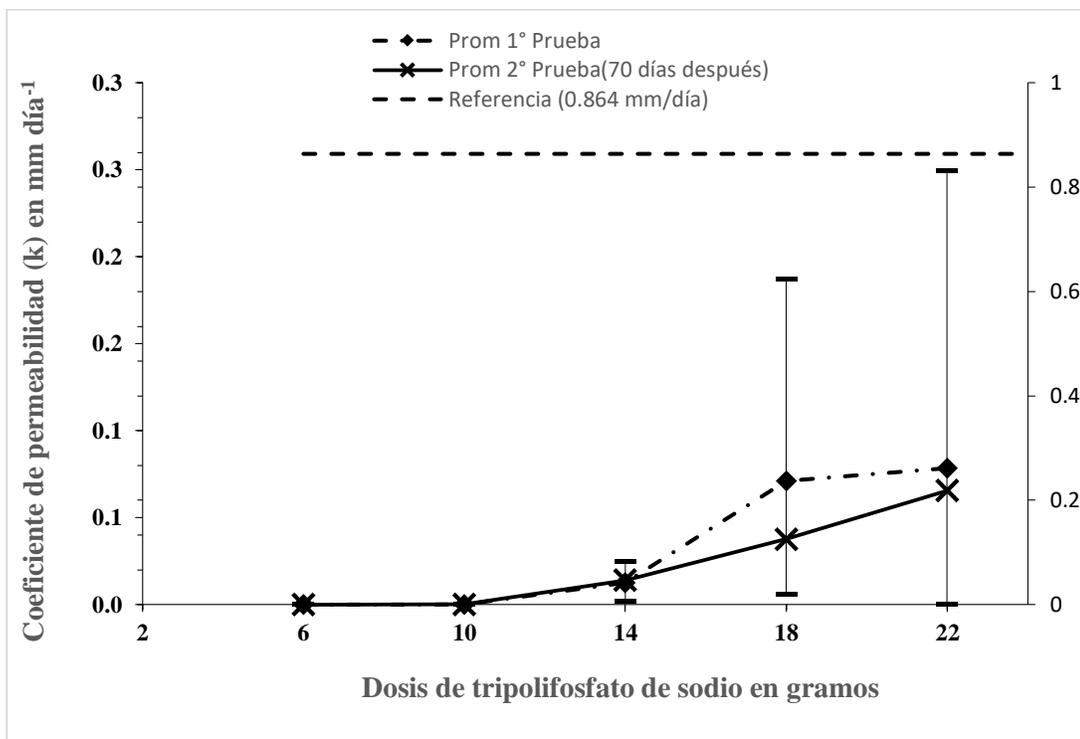


Figura 39. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con tripolifosfato de sodio.

7.4.4. Fosfato de sodio

En el caso del fosfato de sodio, los valores de permeabilidad en la primera prueba estuvieron entre 0 y 0.06 mm día^{-1} . Para la segunda medición realizada 66 días después, el coeficiente de permeabilidad promedio disminuyó en tres dosis diferentes a ($K = 0.01 \text{ mm día}^{-1}$). El rango de las permeabilidades observadas fue entre 0 y 0.05 mm día^{-1} (Figura 40) con un valor promedio efectivo de 0 mm día^{-1} para la dosis mínima (6 g kg^{-1}); lo cual es muy bueno ya que se encuentra abajo del límite permitido ($K = 0.864 \text{ mm día}^{-1}$).

7.4.5. Silicato de sodio

Al evaluar los tratamientos con silicato de sodio, el promedio del coeficiente de permeabilidad en la primera prueba se situó entre 0.16 y 0.78 mm día^{-1} . En la segunda medición (90 días después) los valores disminuyeron hasta 50% en algunas dosis, encontrando valores entre 0 y 0.30 mm día^{-1} (Figura 41). La dosis que proporcionó el menor coeficiente de permeabilidad ($K = 0.16 \text{ mm día}^{-1}$)

¹) fue 6 g kg^{-1} , la cual al compararse con el valor de referencia ($K = 0.864 \text{ mm día}^{-1}$) se observa que en la primera medición el promedio máximo se ubicó ligeramente abajo del máximo permisible, sin embargo, en la segunda medición se alcanzó un valor menor, y por tanto aceptable.

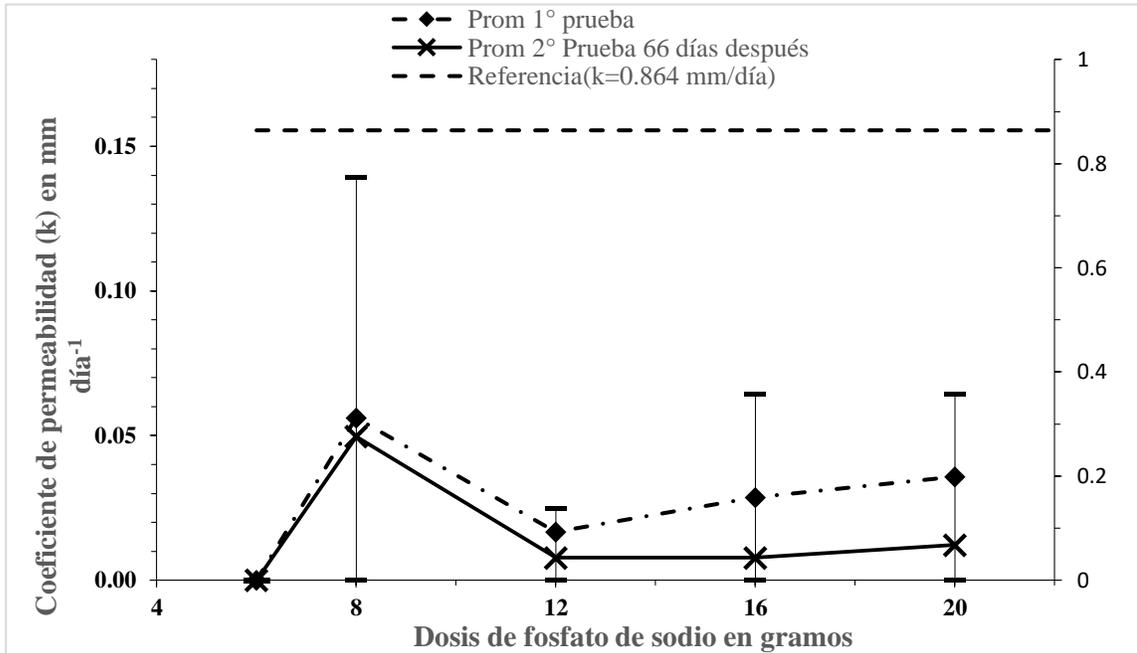


Figura 40. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con fosfato de sodio.

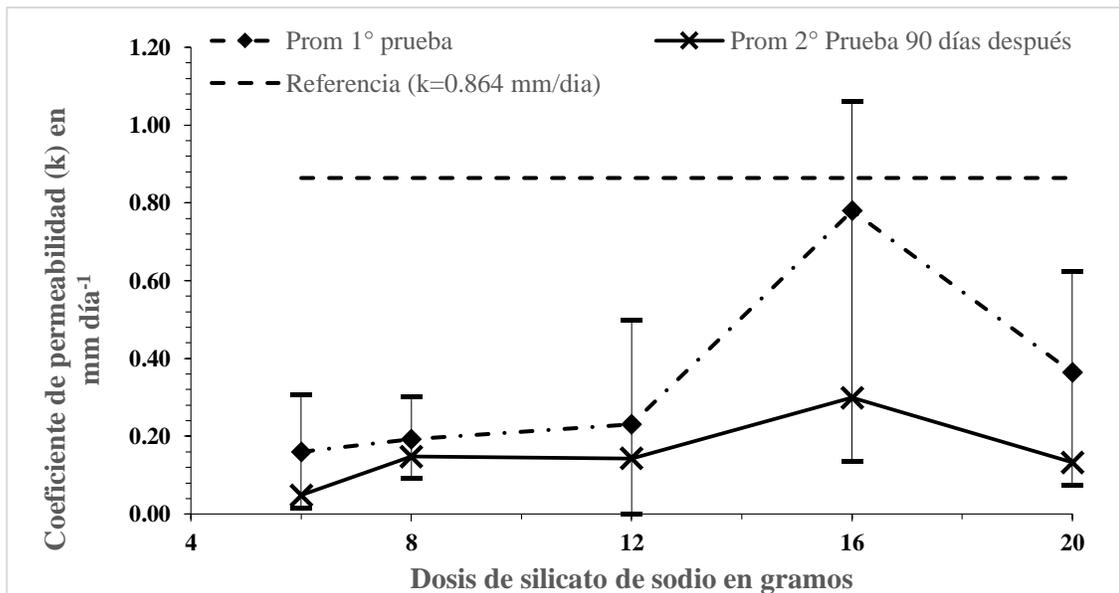


Figura 41. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con silicato de sodio.

7.4.6. Cloruro de sodio

Con respecto al cloruro de sodio, el coeficiente de permeabilidad se situó en el rango recomendado ($K = 0.864 \text{ mm día}^{-1}$). En la primera prueba, el promedio se estableció entre 0.27 y 0.53 mm día^{-1} (Figura 42); mientras que en la segunda prueba (70 días después) el valor además de disminuir osciló entre 0.03 y 0.08 mm día^{-1} . Los tratamientos con la menor infiltración ($K = 0.03 \text{ mm día}^{-1}$) dosis máximas de cloruro de sodio (16 y 20 g kg^{-1}).

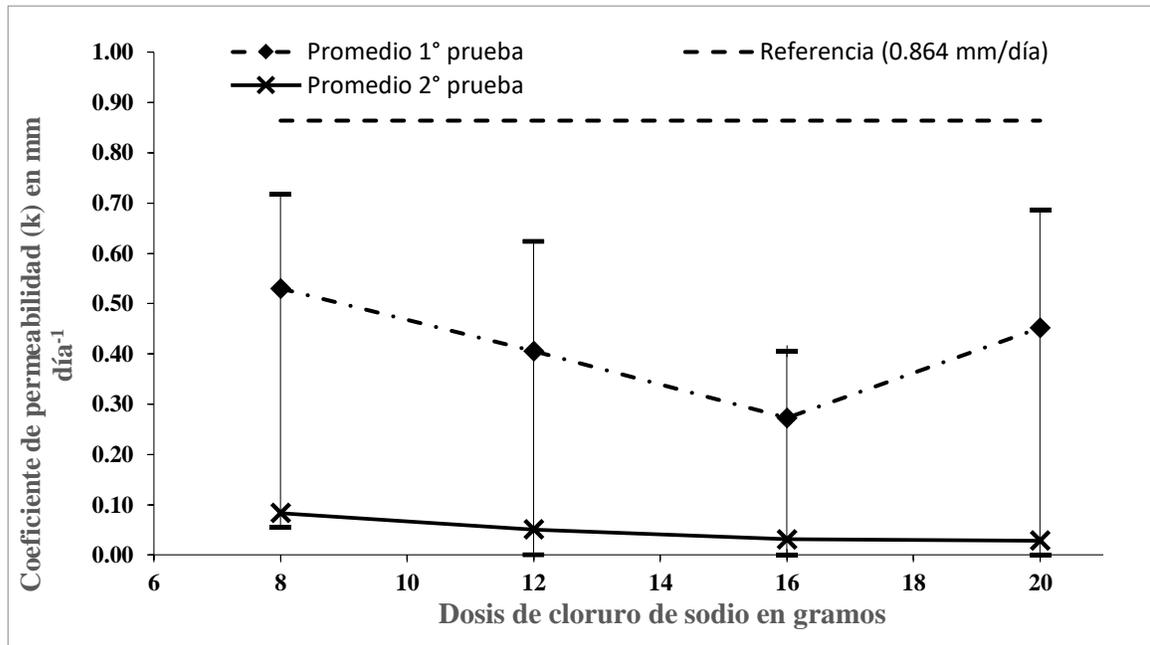


Figura 42. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con cloruro de sodio.

7.4.7. Hidróxido de sodio

El coeficiente de permeabilidad, utilizando hidróxido de sodio, tuvo la misma tendencia que el cloruro de sodio y también se situó por debajo del umbral de los $0.864 \text{ mm día}^{-1}$. Así para la primera prueba, los valores promedio de las cuatro repeticiones se situaron entre 0.04 y 0.11 mm día^{-1} (Figura 43). En la segunda medición, 80 días después, los valores disminuyeron entre 0.02 y 0.10 mm día^{-1} . Resultando 4 g kg^{-1} de hidróxido de sodio como la dosis efectiva para controlar la permeabilidad a un nivel de 0.02 mm día^{-1} .

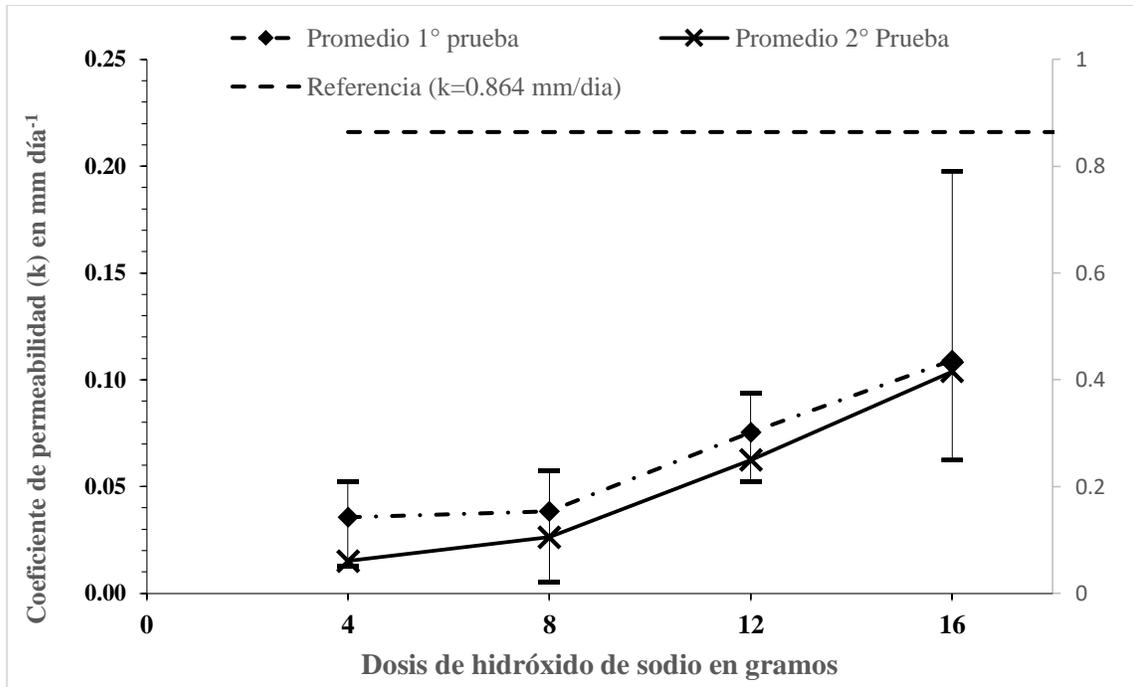


Figura 43. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con hidróxido de sodio.

La efectividad de los tratamientos con dispersantes de partículas está relacionada con las características químicas del suelo. La primera se debe a la alta proporción de iones de Na^+ que tienen una carga única, gran tamaño hidratado y son atraídos débilmente por los coloides del suelo. La segunda característica, es la baja concentración de electrolitos en el suelo (CE) permitiendo la dispersión de las arcillas (Weil y Brady, 2017). La última característica se debió a la incorporación de sodio al suelo, que al hidrolizarse aumentó drásticamente la concentración de iones hidroxilo de la solución del suelo (Brady, 1984), incrementando el pH, la CIC y el PSI (de 10% a un valor mayor del 15%) provocando la dispersión de la caolinita, montmorillonita y halloysita (Shainberg y Letey, 1984). En el caso de la montmorillonita, ésta aumenta su grado de hinchamiento y a medida que se expande los poros más grandes responsables del drenaje del agua en el suelo se cierran, desarrollando una estructura de suelo firme e impermeable (Weil y Brady, 2017).

7.4.8. Bentonita sódica

En los tratamientos con bentonita sódica, los valores se ubicaron entre 0.20 y 1.59 mm día⁻¹ para la primera prueba, mientras que en la segunda medición realizada 70 días después los valores fueron menores y variaron entre 0.12 y 1.23 mm día⁻¹ (Figura 44). Al comparar los resultados de

ambas mediciones se observó que, a mayor dosis y paso del tiempo, el coeficiente era menor. Así los tratamientos de 45 y 60 g kg⁻¹ estuvieron por abajo del umbral permitido ($K = 0.864 \text{ mm día}^{-1}$); alcanzando el tratamiento de 60 g kg⁻¹ una infiltración mínima de 0.12 mm día^{-1} . La bentonita sódica resultó efectiva en las dosis más altas debido principalmente a la alta proporción de arcillas que permitieron sellar el suelo, esto se debe a que la bentonita pertenece al grupo de las arcillas expandibles de tipo 2:1 y forma una barrera altamente impermeable al movimiento del agua (Weil y Brady, 2017).

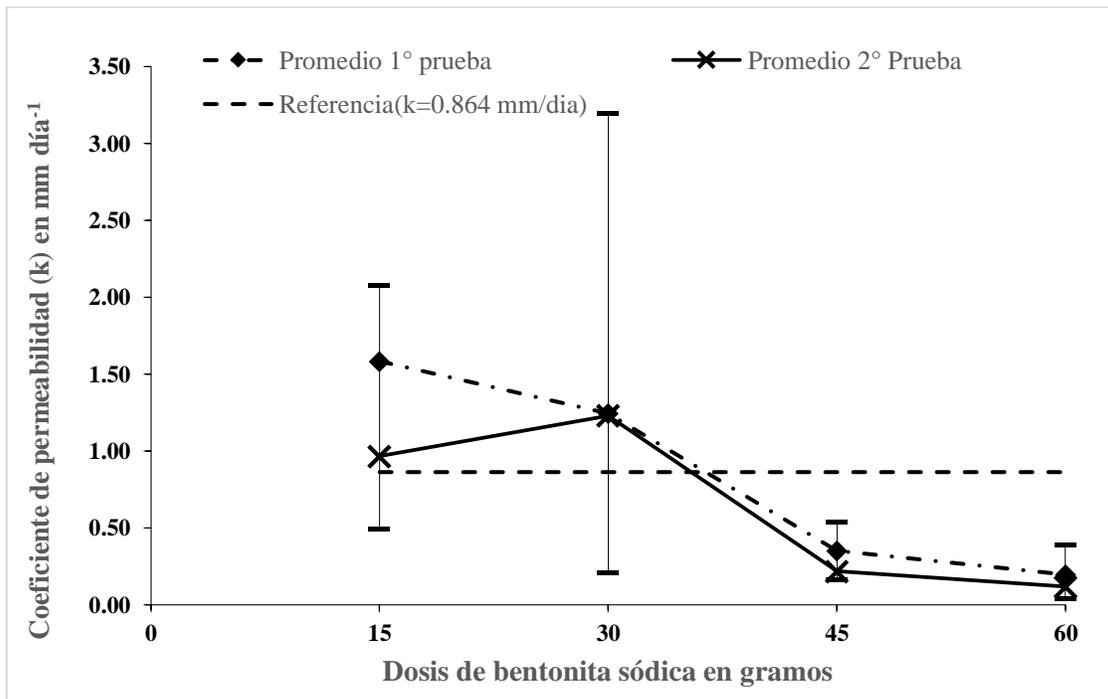


Figura 44. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con bentonita sódica.

7.4.9. Cemento-arena

Los tratamientos con cemento-arena en la primera prueba mostraron valores promedios en sus cuatro repeticiones entre 0.07 y 0.19 mm día^{-1} (Figura 45). A los 30 días de la mezcla, los promedios observados disminuyeron entre 0.05 y 0.08 mm día^{-1} . La dosis de cemento que disminuyó la infiltración fue 12%, para la arena fue 10% con respecto al peso del suelo ($K = 0.05 \text{ mm día}^{-1}$) el valor fue ligeramente más alto que el obtenido por Payán *et al.* (2017) $K = 0.026 \text{ mm día}^{-1}$ para el mismo suelo tipo CL con la diferencia en la compactación del suelo que fue a una densidad específica de 1.83 g cm^{-3} para una humedad óptima de 14.6%. Al comparar 0.05 mm día^{-1}

¹ con el valor umbral de referencia $0.846 \text{ mm día}^{-1}$ todas las dosis se ajustaron, esto se debe principalmente a tres razones, una de ellas es la gran cantidad de material fino presente en el suelo que ocasiona capas impermeables (De la Fuente, 2013). La segunda característica es la reacción química que el cemento hace con el suelo produciendo intercambio iónico y cementación. La tercera razón es el contenido de arena en los tratamientos, según Higuera *et al.* (2012) las arenas tienen la característica de aumentar la estabilidad y resistencia del suelo.

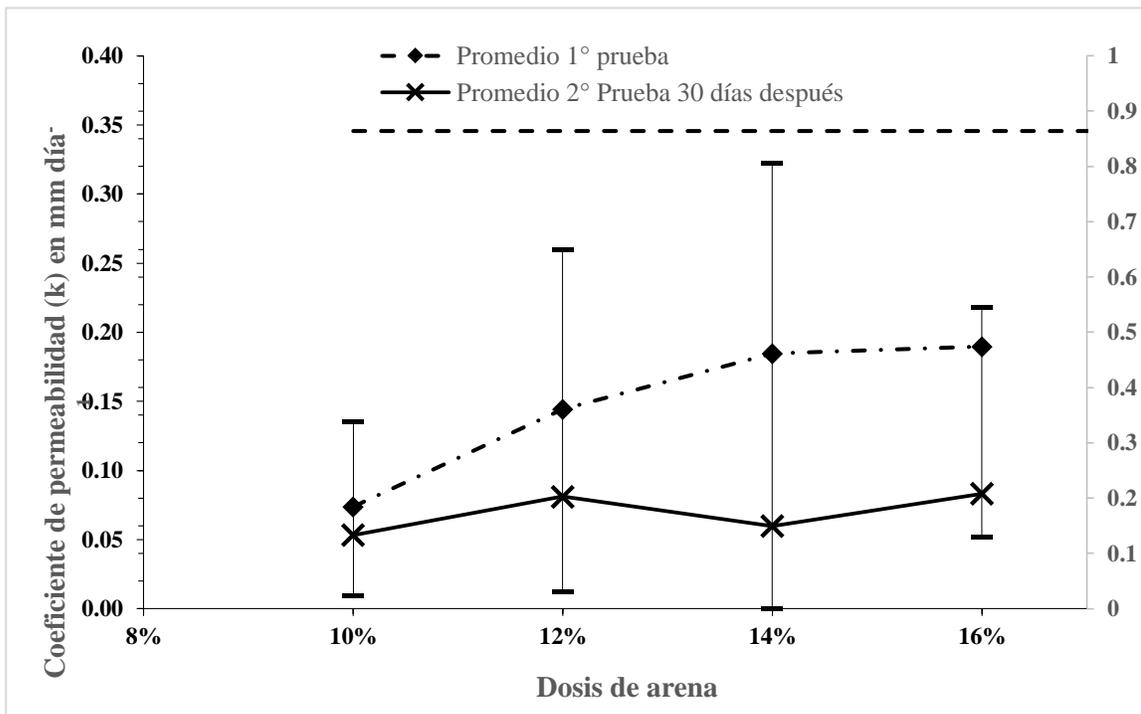


Figura 45. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con cemento-arena.

7.4.10. Cal hidratada

La cal hidratada, en la primera prueba resultaron valores elevados del coeficiente de permeabilidad, del orden de 246.96 y $280.63 \text{ mm día}^{-1}$; para la segunda prueba (115 días después) el valor de la permeabilidad disminuyó entre 8.61 y $20.08 \text{ mm día}^{-1}$ (Figura 46); la permeabilidad más baja ($K = 8.61 \text{ mm día}^{-1}$) corresponde a 18% de cal. A pesar de haber obtenido en la segunda medición valores más bajos respecto a la primera, los tratamientos no entran dentro del límite aceptable ($K = 0.864 \text{ mm día}^{-1}$), esto probablemente está relacionado con la cantidad de calcio agregado en forma de cal hidratada que promovió la floculación de la arcilla y la permeabilidad

del suelo (Litle, 1995; Weil y Brady, 2017). La dosis más baja de cal proporciona la permeabilidad más alta debido a la menor concentración de iones de calcio que permiten el paso del agua. Lo contrario sucede con la dosis más alta que satura el suelo con los iones de calcio disminuyendo la permeabilidad del suelo.

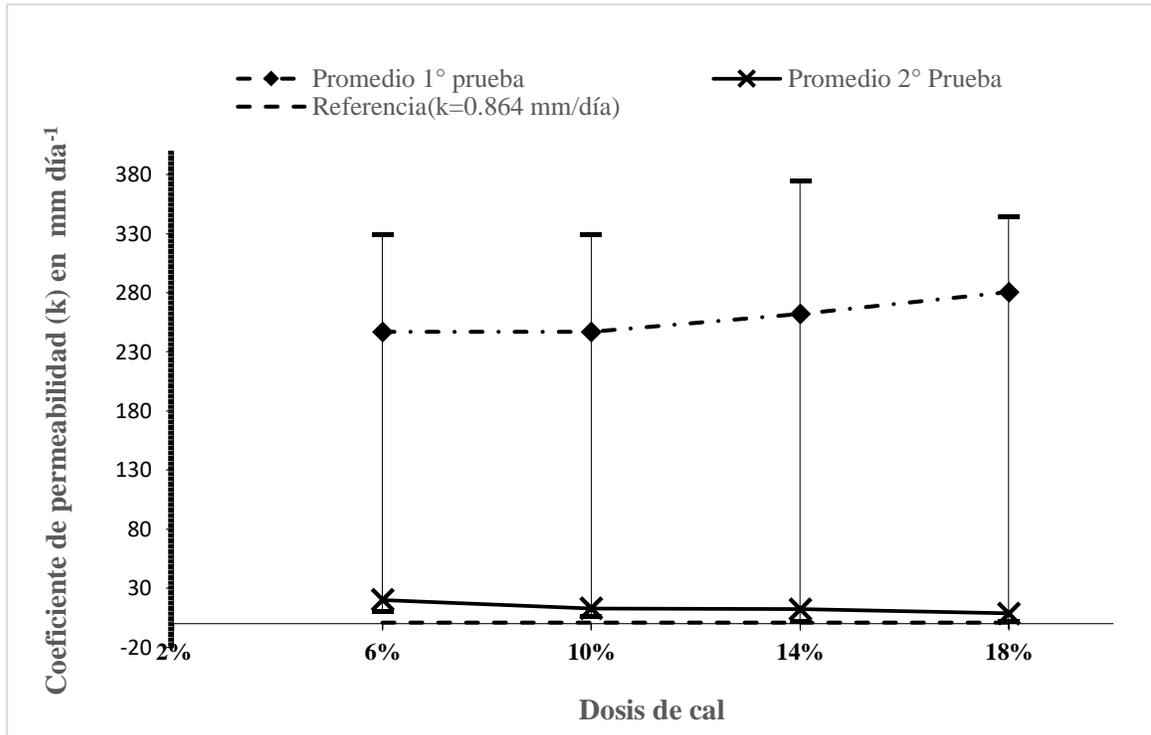


Figura 46. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con cal hidratada.

7.4.11. Compactación próctor estándar

El tratamiento realizado con una compactación del suelo, al menos el 85% de la prueba próctor estándar, mostró coeficientes de permeabilidad menores al umbral de 0.864 mm día⁻¹. El valor promedio de la permeabilidad en la primera prueba fue de 0.53 mm día⁻¹, en la segunda medición realizada 64 días después, el promedio fue 0.70 mm día⁻¹ y en la última prueba 35 días después de la segunda el valor aumentó a 1.09 mm día⁻¹ (Figura 47). En este tratamiento se observó inestabilidad en la columna por cambios de humedad del suelo por secado y mojado de la muestra compactada, debido principalmente al contenido de arcilla expandible de tipo 2:1 montmorillonita (Weil y Brady, 2017) cuya propiedad de contracción-hinchamiento conduce a problemas de agrietamiento y desplazamiento cuando se construyen obras de ingeniería civil sobre suelos esmectíticos (Schulze, 2002).

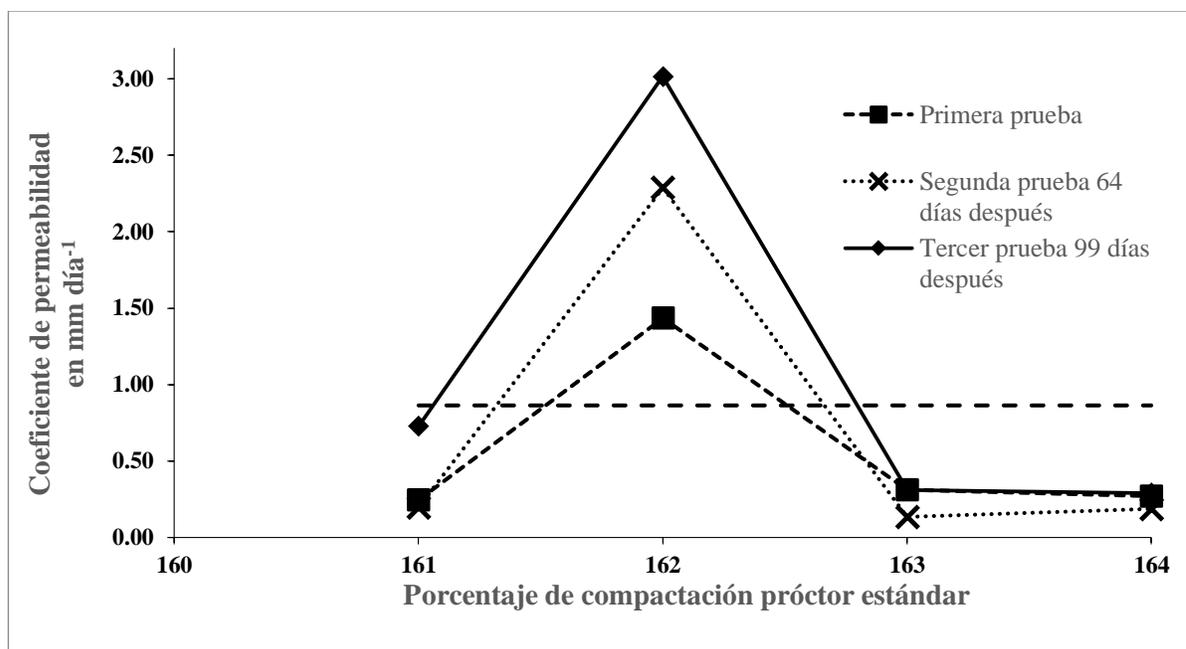


Figura 47. Coeficiente de permeabilidad del tratamiento prueba próctor.

7.4.12. Muestra inalterada (testigo)

En el tratamiento con la muestra inalterada se obtuvo un valor promedio de 13.25 mm día⁻¹ que representa las pérdidas de agua por infiltración en el sitio de estudio, este valor es considerado alto y forma parte de la clasificación de un suelo permeable (FAO, 2020), no apto para almacenar agua en pequeñas obras de almacenamiento. Si se considera la evaporación diaria promedio (Evaporación=3.48 mm día⁻¹), aumentamos la pérdida de agua hasta 16.74 mm día⁻¹ que se traduce en pérdidas significativas para los pequeños bordos de almacenamiento (SAGARPA, 2017).

7.5. Comparación de valores mínimos, máximos y promedios de la permeabilidad

En el Cuadro 16 se muestra la media, el valor mínimo y máximo del coeficiente de permeabilidad para cada tratamiento. Al comparar el valor mínimo del coeficiente de permeabilidad con el límite permisible $K = 0.864 \text{ mm día}^{-1}$ los tratamientos 1, 2, 41, 46, 42, 43, 3 y 44 no reducen la permeabilidad. Al considerar el valor máximo del coeficiente de permeabilidad, los tratamientos 1, 2, 41, 46, 42, 43, 3, 44, 4, 34, 33 y 45 no cumplen con el límite permitido. Por último, si se comparan los promedios obtenidos con el umbral de referencia los tratamientos 1, 2, 41, 46, 42, 43, 3, 44, 4, 34 y 33 no son efectivos. Lo que significa que el tratamiento T45 no cumple con el límite permisible al considerar el valor máximo.

Cuadro 16. Comparación de valores máximos, mínimos y promedios del coeficiente de permeabilidad.

Tratamiento	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Est.	Tratamiento	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Est.
T1	80.75a	37.32	157.15	56.92	T39	0.06d	0.00	0.10	0.04
T2	47.79b	23.95	91.21	31.22	T20	0.05d	0.03	0.08	0.02
T41	20.08c	9.73	27.44	7.52	T37	0.05d	0.01	0.10	0.04
T46	13.25cd	10.10	16.46	2.75	T15	0.05d	0.00	0.16	0.07
T42	12.91cd	6.24	21.20	7.35	T14	0.05d	0.00	0.11	0.06
T43	12.22cd	2.00	32.43	13.84	T26	0.05d	0.00	0.09	0.04
T3	11.82cd	5.99	14.97	4.21	T8	0.04d	0.02	0.06	0.02
T44	8.61cd	2.25	20.70	8.23	T13	0.04d	0.01	0.10	0.04
T4	5.86d	0.66	12.19	4.75	T27	0.03d	0.00	0.08	0.03
T34	1.23d	0.21	3.20	1.33	T28	0.03d	0.00	0.12	0.06
T33	0.97d	0.50	2.08	0.75	T30	0.03d	0.01	0.05	0.02
T45	0.7d	0.14	2.29	1.06	T7	0.03d	0.00	0.04	0.02
T23	0.3d	0.14	0.70	0.27	T9	0.02d	0.00	0.08	0.04
T35	0.22d	0.17	0.27	0.04	T12	0.02d	0.01	0.02	0.01
T21	0.15d	0.10	0.23	0.06	T19	0.01d	0.00	0.03	0.02
T22	0.14d	0.00	0.36	0.16	T29	0.01d	0.01	0.02	0.01
T24	0.13d	0.07	0.19	0.06	T17	0.01d	0.00	0.03	0.01
T36	0.12d	0.04	0.23	0.08	T18	0.01d	0.00	0.01	0.01
T32	0.1d	0.06	0.12	0.03	T10	0d	0.00	0.00	0.00
T25	0.08d	0.05	0.11	0.03	T11	0d	0.00	0.00	0.00
T38	0.08d	0.01	0.14	0.06	T16	0d	0.00	0.00	0.00
T40	0.08d	0.05	0.11	0.03	T5	0d	0.00	0.00	0.00
T31	0.06d	0.05	0.08	0.01	T6	0d	0.00	0.00	0.00

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$, Fisher-LSD), Desv. Est.= Desviación estándar.

7.6.Comparación de tratamientos

De la comparación estadística, se concluye con un nivel de significancia $\alpha=0.05$ que no todos los tratamientos producen el mismo efecto en el coeficiente de permeabilidad del suelo, se obtuvo un valor $Pr=2e^{-16}$ que significa que al menos una de las medias es diferente. Como se muestra en el Cuadro 17, se obtuvieron 35 tratamientos sin diferencias significativas entre ellos y con

permeabilidades por debajo del nivel permisible de 0.864 mm día⁻¹; pudiendo ser cualquiera de ellos candidatos para el control de la permeabilidad del suelo residual.

Cuadro 17. Grupos de comparación de medias obtenido del software R.

Tratamiento	K(mm día ⁻¹)	Tratamiento	K(mm día ⁻¹)	Tratamiento	K(mm día ⁻¹)
	1. Gleyzación		5. Silicato de sodio		9. Cemento-arena
T1	80.75 ± 56.92a	T20	0.05 ± 0.02d	T37	0.05 ± 0.04d
T2	47.79 ± 31.22b	T21	0.15 ± 0.06d	T38	0.08 ± 0.06d
T3	11.82 ± 4.21cd	T22	0.14 ± 0.16d	T39	0.06 ± 0.04d
T4	5.86 ± 4.75d	T23	0.30 ± 0.27d	T40	0.08 ± 0.03d
		T24	0.13 ± 0.06d		
	2. Carbonato de sodio		6. Cloruro de sodio		10. Cal hidratada
T5	0 ± 0d	T25	0.08 ± 0.03d	T41	20.08 ± 7.52c
T6	0 ± 0d	T26	0.05 ± 0.04d	T42	12.91 ± 7.35cd
T7	0.03 ± 0.02d	T27	0.03 ± 0.03d	T43	12.22 ± 13.84cd
T8	0.04 ± 0.02d	T28	0.03 ± 0.06d	T44	8.61 ± 8.23cd
T9	0.02 ± 0.04d				
	3. Tripolifosfato de sodio		7. Hidróxido de sodio		11. Prueba próctor
T10	0 ± 0d	T29	0.01 ± 0.005d	T45	0.7 ± 1.06d
T11	0 ± 0d	T30	0.03 ± 0.02d		
T12	0.02 ± 0.01d	T31	0.06 ± 0.01d		
T13	0.04 ± 0.04d	T32	0.1 ± 0.03d		
T14	0.05 ± 0.06d				
	4. Fosfato de sodio		8. Bentonita sódica		12. Muestra inalterada (testigo)
T15	0.05 ± 0.07d	T33	0.97 ± 0.75d	T46	13.25 ± 2.75cd
T16	0 ± 0d	T34	1.23 ± 1.33d		
T17	0.01 ± 0.01d	T35	0.22 ± 0.04d		
T18	0.01 ± 0.005d	T36	0.12 ± 0.08d		
T19	0.01 ± 0.02d				

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$, Fisher-LSD), Desv. Est.= Desviación estándar, Coeficiente de variación = 211.573, LSD (diferencia mínima significativa) =14.036 y cuadrado medio del error=100.78.

Del Cuadro 17, se observa que los tratamientos que no cumplen con el valor máximo de referencia $k=0.864 \text{ mm día}^{-1}$ son: cal hidratada (T41, T42, T43 y T44), gleyzación (T1, T2, T3 y T4), bentonita sódica (T33 y T34) y muestra inalterada (T46) (Figura 48). Si analizamos los tratamientos con cal hidratada se observa que a mayor dosis la infiltración se reduce. Sin embargo, existe otro factor que determina la efectividad de la misma y es el tiempo. En la investigación, la medición se hizo hasta un lapso de 115 días, lo que evitó valorar su efectividad. Herrier *et al.* (2013) obtuvo valores satisfactorios en un plazo de 35 años.

Con respecto a los tratamientos con el método de sellado gleyzación, los valores encontrados indican que las dosis utilizadas fueron bajas, adicionando el tiempo de medición (81 días), periodo muy corto, comparado con los cinco años que McConkey *et al.* (1990) dejó el experimento hasta alcanzar una permeabilidad de $48.72 \text{ mm día}^{-1}$.

Los tratamientos no efectivos de bentonita sódica se debieron porque las dosis fueron bajas para mantener costos del sellado en niveles aceptables. Por último, en la muestra inalterada, la permeabilidad representa las condiciones naturales del sitio de estudio.

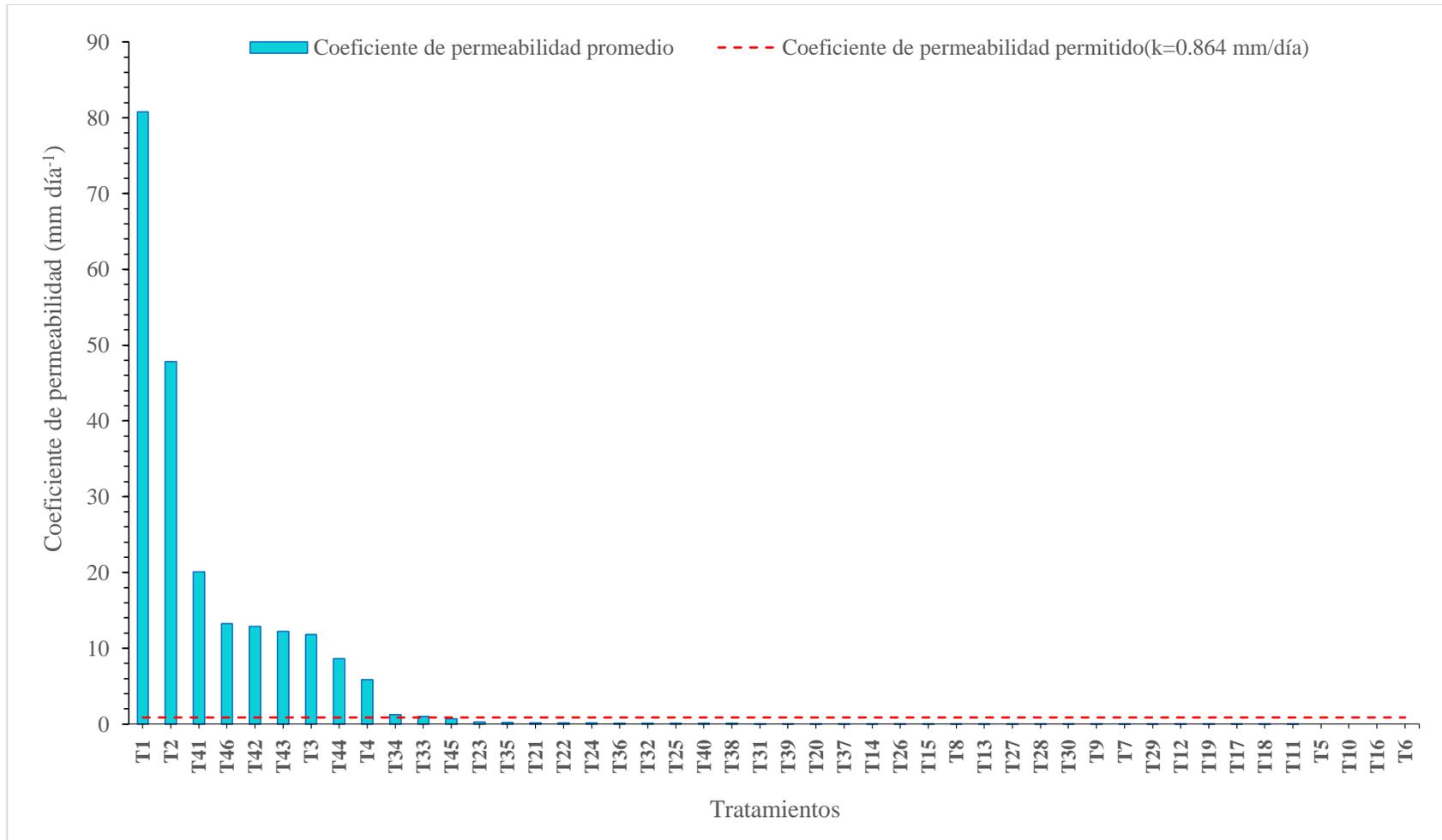


Figura 48. Coeficiente de permeabilidad promedio en tratamientos.

7.7. Análisis económico

El análisis de la estadística encontró que 35 tratamientos presentan infiltraciones por debajo del umbral de $0.864 \text{ mm día}^{-1}$, marcados con la letra d (Cuadro 17). De estos tratamientos, se analizó costo unitario con relación al costo unitario de la geomembrana (Cuadro 18), resultando 32 tratamientos con costos inferiores a la geomembrana (Figura 49).

Los resultados mostraron que el mejor tratamiento tanto económicamente como efectivo fue T45 (compactación próctor estándar), sin embargo, al evaluar el coeficiente de permeabilidad hubo inestabilidad en la columna del suelo, dando valores muy dispersos, lo cual no es recomendable utilizarlo como un método para controlar filtraciones.

Como segunda alternativa se tienen tratamientos con dispersantes, entre ellos el cloruro de sodio (T25, T26, T27 y T28), carbonato de sodio (T5, T6, T7, T8 y T9), hidróxido de sodio (T29, T30, T31 y T32), tripolifosfato de sodio (T10, T11, T12, T13 y T14), silicato de sodio (T20, T21, T22, T23 y T24) y fosfato de sodio (T15 y T16) Estos tratamientos, redujeron la infiltración promedio entre 0 y 0.30 mm día^{-1} , aunque las permeabilidades resultantes son aceptables se tiene el inconveniente, como menciona Neff (1980) de requerir aplicaciones cada dos o tres años para mantener su eficacia.

Como tercera opción se tienen los tratamientos con cemento-arena (T37, T38, T39 y T40), los cuales redujeron el coeficiente de permeabilidad de muy buena manera, entre 0.05 y 0.08 mm día^{-1} , un valor excelente. La ventaja de este método, es que no requiere de mantenimiento y según Payán *et al.* (2017) su efecto es duradero; aunque sus costos alcanzan en promedio un 66% respecto a la geomembrana. Por otra parte, los tratamientos con bentonita sódica (T35 y T36) resultaron efectivos alcanzando sus costos 68% y 88%, respectivamente, comparados con la geomembrana.

Cuadro 18. Análisis económico de los tratamientos.

Tratamientos	Precio unitario(m ²)	Costo relativo	Coefficiente de permeabilidad (mm día ⁻¹)
Geomembrana	\$ 194.08		
T45	\$ 10.23	5%	0.70
T25	\$ 14.82	8%	0.08
T26	\$ 17.09	9%	0.05
T27	\$ 19.36	10%	0.03
T29	\$ 21.57	11%	0.02
T28	\$ 21.63	11%	0.03
T5	\$ 21.65	11%	0.00
T6	\$ 33.07	17%	0.00
T30	\$ 33.20	17%	0.03
T20	\$ 44.48	23%	0.06
T7	\$ 44.49	23%	0.02
T31	\$ 44.55	23%	0.06
T10	\$ 46.19	24%	0.00
T21	\$ 48.42	25%	0.15
T32	\$ 55.89	29%	0.10
T8	\$ 55.91	29%	0.04
T11	\$ 60.98	31%	0.00
T9	\$ 67.33	35%	0.02
T22	\$ 78.72	41%	0.14
T12	\$ 94.13	49%	0.01
T23	\$ 101.55	52%	0.30
T13	\$ 118.11	61%	0.04
T24	\$ 124.38	64%	0.13
T37	\$ 126.66	65%	0.05
T38	\$ 127.81	66%	0.08
T39	\$ 128.95	66%	0.06
T40	\$ 130.09	67%	0.08
T35	\$ 131.15	68%	0.22
T14	\$ 142.08	73%	0.05
T15	\$ 146.77	76%	0.05
T36	\$ 171.45	88%	0.12
T16	\$ 172.77	89%	0.00

Nota: El análisis del precio unitario se puede observar en el anexo 5 y los precios utilizados se visualizan en los anexos 6 y 7.

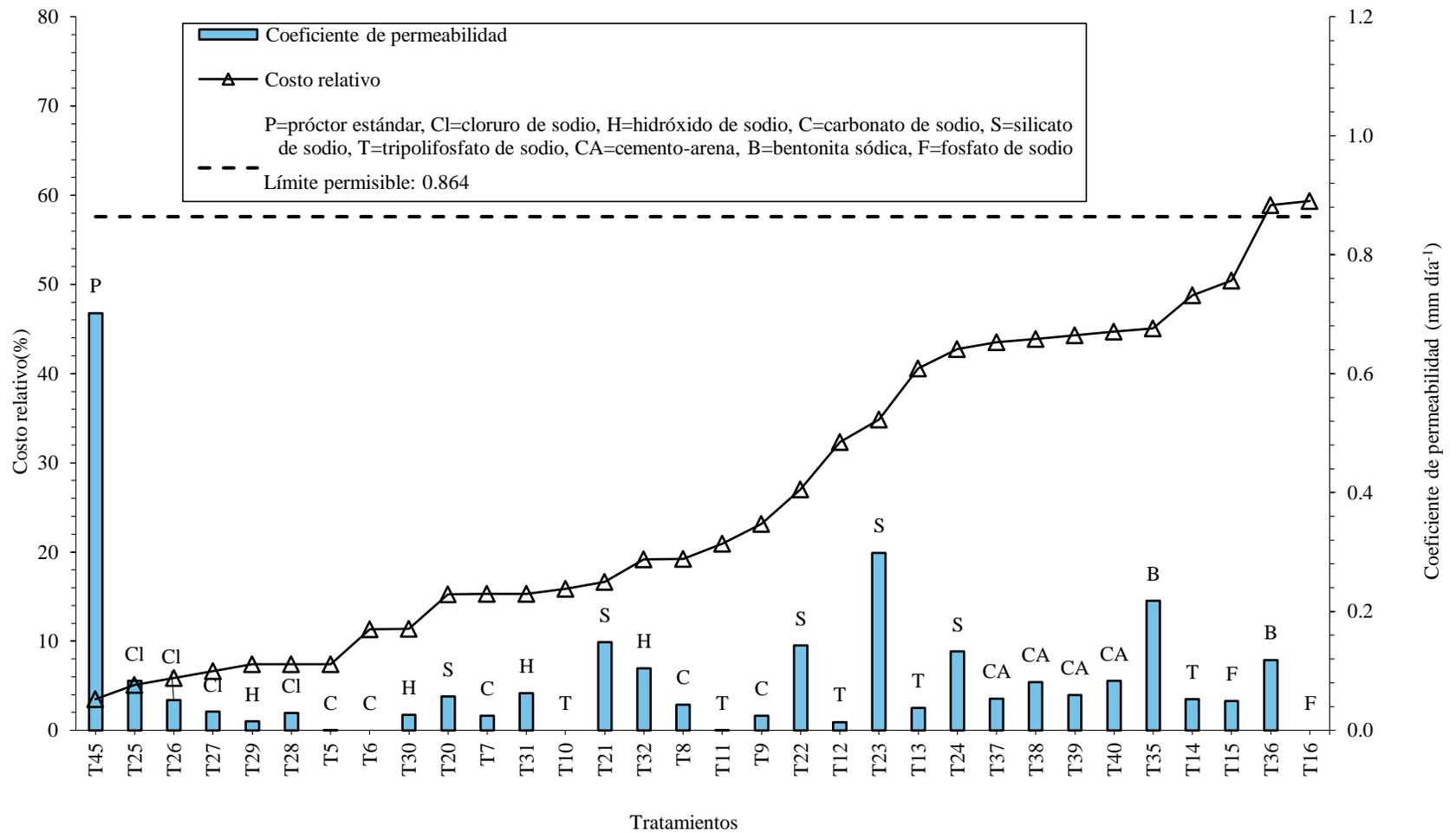


Figura 49. Comparación entre el coeficiente de permeabilidad y el análisis económico de los tratamientos efectivos

8. CONCLUSIONES

1. Los mejores tratamientos en cuanto a reducción de la permeabilidad fueron dosis bajas de carbonato de sodio, tripolifosfato de sodio y fosfato de sodio con valores de 0 mm día^{-1} .
2. El mejor tratamiento económicamente fue la compactación próctor estándar, seguido por tratamientos con hidróxido de sodio, carbonato de sodio, silicato de sodio, tripolifosfato de sodio, cemento-arena, bentonita sódica y fosfato de sodio.
3. El mejor tratamiento, en términos económicos y en control de la infiltración, fue la compactación próctor estándar, sin embargo, al evaluar el coeficiente de permeabilidad hubo inestabilidad en la columna del suelo, dando valores muy dispersos, por lo cual no es recomendable utilizarlo como un método para controlar filtraciones. Los tratamientos con dispersantes de partículas son recomendables, aunque hay que considerar aplicaciones de mantenimiento cada dos o tres años. El uso del cemento-arena y la bentonita resultaron muy eficaz, aunque sus costos son elevados, tienen la ventaja de ser una alternativa duradera.

9. RECOMENDACIONES

1. Para aplicar de manera correcta las técnicas de sellado, se recomienda conocer primero las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo que influyen directamente en la dosificación de los reactivos y/o materiales a utilizar en cada una de las técnicas.
2. De igual manera en el uso específico de dispersantes de partículas como: carbonato de sodio, tripolifosfato de sodio, silicato de sodio, hidróxido de sodio, fosfato de sodio y cloruro de sodio se sugiere integrar el reactivo correctamente, revolver bien la tierra y cubrir la superficie con tierra sin tratar para evitar cuarteaduras y/o secado del suelo. El espesor mínimo recomendado es 15 cm.
3. Es indispensable realizar la prueba de compactación próctor estándar previamente para poder determinar el porcentaje óptimo de agua y la densidad específica objetivo. A mayor densidad específica los tratamientos funcionaron mejor.
4. Se recomienda estudiar el comportamiento de los métodos no efectivos (suelo-cal y gleyzación) a largo plazo y poder visualizar si el tiempo es un factor determinante en su efectividad en el control de la infiltración.

10. REFERENCIAS

- Ahmad, S., M. Aslam and M. Shafiq. 1996. Reducing water seepage from earthen ponds. *Agricultural Water Management*. 30: 69-76. doi: 10.1016 / 0378-3774 (95) 01203-6
- Alvarado A., R. Mata., y M. Chinchilla. 2014. Arcillas identificadas en suelos de costa rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense*. 38:75-106.
- ASTM D2487-17e1. 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>. (Consulta: octubre 5, 2020).
- ASTM D4318-05. 2005. Métodos de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos, ASTM International, West Conshohocken. www.astm.org
- ASTM D698-12e2. 2012. Métodos de prueba estándar para las características de compactación de suelo en laboratorio utilizando un esfuerzo estándar (12 400 ft-lbf / ft³ (600 kN-m / m³)), ASTM International, West Conshohocken. www.astm.org
- Barreto F., F.L., H.O. Carvalho G., y H.R. Gheyi. 2003. Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 7:403-407
- Bigham, J.M., R.W. Fitzpatrick, and D.G. Schulze. 2002. Chapter 10 Iron Oxides. In: *Soil Mineralogy with Enviromental Applications*. Dixon, J.B., and D.G. Schulze (eds). Madison, Wisconsin, USA. Soil Science Society of America, Inc. pp: 324-360. doi:10.2136/sssabookser7
- Bowles, J.E. 2006. Primer taller de mecánica de suelos. Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía estandar (56 000 pie-lb/pie³ [2 700 kN-m/m³]) (próctor estándar). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Brady, N.C. 1984. *The nature and properties of soils*. Macmillan. Ninth edition. Publishing Company, United States of America. 780 p.
- Büttner R., Dellino P. and Zinranowski B. 1999. Identifying magma – water interaction from the surface features of ash particles. *Nature*. 401:688-690.
- CGM (Coordinación General de Minería). 2012. Perfil de mercado de la Bentonita. Dirección General de Desarrollo Minero. 47 p.
- Chang, A. C., W.R. Olmstead, J.B. Johanson, and G. Yamashita. 1974. The sealing mechanism of wastewater ponds. *Water Pollution Control Federation*, 46:1715-21.

- Chapman, H. D. 1965. Cation-Exchange Capacity. In: C.A. Black (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Madison, Wis., ASA. Agronomy. 9:891-900.
- CMIC (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción). 2019. *Costos horarios de Maquinaria*. Centro Nacional de Ingeniería de Costos. 216 p.
- Crespo V., C. 2004. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 5ª edición. Limusa, México. 650 p.
- Dahlgren, R. A., M. Saigusa and F.C. Ugolini. 2004. The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils. *Advances in Agronomy*. 82:113–182. doi:10.1016/s0065-2113(03)82003-5
- Dahlgren, R.A., S. Shoji and M. Nanzoyo. 1993. Chapter 5 Mineralogical Characteristics of Volcanic Ash Soils. In: *Volcanic Ash Soils - Genesis, Properties y Utilization*, Shoji, S., R. Dahlgren, and M. Nanzoyo(eds). Amsterdam. Elsevier. pp:101-143. doi:10.1016/s0166-2481(08)70266-6
- Davis, S., Vv. Fairbank., and H. Weisheit. 1973. Dairy, waste ponds effectively selfsealing. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 16:69-71.
- De la Fuente L., E. 2013. *Suelo – Cemento. Sus usos, propiedades y aplicaciones*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México. 81p.
- Dixon, J.B., and G.N. White. 2002. Chapter 11 Manganese Oxides. In: *Soil Mineralogy with Enviromental Applications*. Dixon, J.B., and D.G. Schulze (eds). Madison, Wisconsin, USA. Soil Science Society of America, Inc. pp: 367-386. doi:10.2136/sssabookser7
- Dorfman, B. 1988. *Estabilización de suelos*. Universidad del Cauca, Popayán.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2020. http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm#top
- Fassbender, H.W. y E. Bornemisza. 1994. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. 2ª ed. IICA, Costa Rica. 420 p.
- Ferrari L., T. Orozco-Esquivel., V. Manea y M. Manea. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*. 522-523:122–149. doi: 10.1016/j.tecto.2011.09.018
- Fieldes, M., and K.W. Perrot. 1966. “The nature of allophane in soils”. *New Zealand Journal of Science*. 9:623:629
- Fisher, R.V., and H.U. Schmincke. 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag.
- Gilbert, J.S., R.S.J. Sparks., and T. Koyaguchi. 1991. Charge measurements on particle fallout from a volcanic plume. *Nature*. 349:598-600

- Gisbert, B., J.M., S. Ibáñez A., y H. Moreno R. 2020. Procesos formadores de suelos: Vertisoles. Universidad Politécnica de Valencia. Consultado en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12869/Vertisoles.pdf?sequence=3>
- Grim, R. E. 1968. Clay Mineralogy. 2da Ed. McGraw Hill, New York. 596 p.
- Hernández S., J.M.D., D.S. Fernández R., M.R. Martínez M., B. Figueroa S., E. Rubio G., y J.L. García R. 2019. Terra Latinoamericana. 37:303-313.
- Herrera A., M.C. 2005. Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: Estudio fundamental e implicaciones en Ingeniería. Tesis. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Bogotá.
- Herrier, G., D. Puiatti, C. Chevalier, M. Froumentin, S. Bonelli, and J.J. Fry. 2013. Lime Treatment: New Perspectives for the use of Silty and Clayey Soils in Earthen Hydraulic Structures. 9th ICOLD European Club Symposium, Venise, Italy.
- Higuera S., C.H. 2010. Estabilización de Suelos. Guías de clase, Universidad del Cauca, Popayán.
- Higuera S., C.H., J.C. Gómez C., y O.E. Pardo N. 2012. Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Revista Facultad de Ingeniería. 21:21-40.
- Huang, P.M., M.K. Wang., N. Kämpf., and D.G. Schulze. 2002. Chapter 8 Aluminum Oxides. In: Soil Mineralogy with Environmental Applications. Dixon, J.B., y D.G. Schulze (eds). Madison, Wisconsin, USA. Soil Science Society of America, Inc. pp: 261-286. doi:10.2136/sssabookser7
- Huezo M., H.M., y A.C. Orellana M. 2009. Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el salvador. Universidad de el Salvador. San Salvador.
- IDU. 2005. Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos. Bogotá D.C.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Huasca de Ocampo, Hidalgo Clave geoestadística 13024.
- Jaramillo J. 2002. Guía para el diseño:05 Diseño de un relleno sanitario manual. Parte 1. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Panamericana de la salud, Organización Mundial de la Salud. Universidad de Antioquia, Colombia. <https://estrucplan.com.ar/guia-para-el-diseno-05-diseno-de-un-relleno-sanitario-manual-parte-1/>
- Jordán L., A. 2006. Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla Profesor asociado a la E.U.I.T.A. 143 p.

- Juárez B., E., y A. Rico R. 1973. Mecánica de suelos: Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. 2da edición. LIMUSA, México. 489 p.
- Khattab, A.F. 1991. Design of dams, second edition, training course, research institute of weed control and channel maintenance. Water Research Center, Ministry of Public Works and Water Resources, Cairo.
- Kunze, G. W., and J. B. Dixon. 1986. Pretreatment for mineralogical analysis. In: Klute, A. Ed. Methods of soil analysis. Part 1. ASA, SSSA. Madison. Wi. USA.
- Leamy, M.L. 1984. Andisols of the world, In: Congreso Internacional de Suelos Volcanicos, Comunicaciones, Universidad de La Laguna Secretariado de Publicaciones, serie informes 13, pp. 368- 387.
- Lenz O. 2009. Fábrica y comportamiento geotécnico de las arcillas volcánicas de Xalapa, México. Revista Ingeniería Civil. 153:111-124.
- Lenz, O. 2016. Zonificación geotécnica de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México. Ingeniería Civil. 181:77-88.
- Little, D.L. 1995. Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. Dubuque (Iowa), Published by Kendall/Hunt Publishing Company.
- McConkey, B.G., C.D., Reimer, W. Nicholaichuk., and Y.W. Jame. 1990. Sealing earthen hydraulic structures with enhanced gleization and sodium carbonate II. Application for lining an Irrigation canal. Canadian Agricultural Engineering. 32:171-176.
- Medina M., F. 2000. Sismicidad y volcanismo en México. México: Fondo de Cultura Económica.
- Mendoza A., W.F., L.M. Salgado V, R. A. Valladares P, H. R. López M, N. Marcía C., y F. Antonio V. 2016. Estudio del comportamiento de la Cal hidratada como estabilizante en arcilla altamente plástica en la aldea de Santa Rita de oriente, municipio de Santa Bárbara, Departamento de Santa Bárbara, Honduras. Revista Sices. 63:63-70.
- Miller, M. H., J.B. Robinson., and R.W. Gillham. 1985. Self-sealing of earthen liquid manure storage ponds: I. a case study. Journal of Environmental Quality. 14:533-8.
- Mitchell, J.K. 1993. Fundamentals of soil behavior. 2nd ed. John Wilwy and Sons, Inc., New York.
- Moreno R., H., y S. A. Ibáñez. 2020. Procesos formadores de suelos: Gleyficación. Universidad Politécnica de Valencia. Consultado en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/122718/Moreno%3BIba%C3%B1ez%2020Procesos%20formadores%3A%20La%20Gleyficaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAlloved=y>
- Neff, E.L. 1980. Using Sodium Carbonate to Seal Leaky Stock Ponds in Eastern Montana. Journal of Range Management. 33:292-295.

- Nerinx, N., S. Bonelli., D. Puiatti., G. Herrier., J.-J. Fry, R. Tourment., and S. Nicaise. 2016. Impact of lime treated soils performance on design of earthfill dams and dikes. International Symposium on “Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries”, Johannesburg. South Africa.
- Nicholaichuk, W. 1978. Seepage control in excavated earthen reservoirs. *Canadian Agricultural Engineering*. 20:97-101.
- Ono, E.A., and F. Kubitz. 2003. Construcción de estanques y de estructuras hidráulicas para el cultivo de peces. Parte 4. *Panorama da Aqüicultura*. 13(75).
- Parfitt, R.L., and J.M. Kimble. 1989. Conditions for formation of allophane soils. *Soil Science Society of America Journal*. 53:971-977.
- Payán A, M.L., L. Tuyub S., y J.A. Cetina M. 2017. Diseño de suelo-cemento para la impermeabilización de sitios de disposición final. *Multidisciplinarias de la Ingeniería*. 5:92-102.
- Payán M. 2002. Estabilización de sahcab con cemento Portland Tipo I para la construcción de pisos en viviendas del medio rural. *Revista Ingeniería*. 6:33-45.
- Pepper, R.G. 1983. Chemical sealing of small earth dams using sodium tripolyphosphate. Department of Agriculture and Food, Western Australia, Perth. *Technical Bulletin* 67.
- Pérez R., A., A. Galvis S., R. Bugarín M., T.M. Hernández M., M.A. Vásquez P., y A. Rodríguez G. 2017. Capacidad de intercambio catiónico: descripción del método de la tiourea de plata (AgTU_n^+). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8:171-177.
- Pfost, D.L., D. Williams., and R. Koenig. 1997. Reducing Pond Seepage. University of Missouri-Columbia. muextension.missouri.edu/xplor/
- Porta C., J., M. López-Acevedo R., y C. Roquero De L. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, España. 960 p.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Racchumi L., V.M. 2018. Tesis: Efecto de la bentonita sódica en la estabilidad y permeabilidad de la base del canal de riego Mishuco, distrito de Nueva Cajamarca, provincia de Rioja, departamento San Martín – 2017”. Perú.
- Reid-Soukup, D.A., and A.L. Ulery. 2002. Chapter 15 Smectites. In: *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Dixon, J.B., and D.G. Schulze (eds). Madison, Wisconsin, USA. Soil Science Society of America, Inc. pp:467-495. doi:10.2136/sssabookser7
- Riley, C. M., W.I. Rose., and G.J.S. Bluth. 2003. Quantitative shape measurements of distal volcanic ash. *Journal of Geophysical Research*. 108(B10).

- Roldán D., J. 2010. Estabilización de suelos con cloruro de sodio (NaCl) para bases y subases. Tesis Profesional.
- Russell, E.W. 1973. Soil conditions and plant growth. 10th ed. Longman Publications, London, England.
- SAGARPA. 2017. Diseño y construcción de jagueyes. Segunda edición.
- Sánchez S., F. 1985. Estabilización de suelos con cal. Universidad del Cauca. Popayán.
- Schulze, D.G. 2002. Chapter 1 An Introduction to Soil Mineralogy. In: Soil Mineralogy with Environmental Applications. Dixon, J.B., and D.G. Schulze (eds). Madison, Wisconsin, USA. Soil Science Society of America, Inc. pp:1-34. doi:10.2136/sssabookser7
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. NOM-021-RECNAT-2000, Norma Oficial mexicana. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F.
- Shoji, S., R. Dahlgren., and M. Nanyo. 1993. Chapter 1 Terminology, Concepts and Geographic Distribution of Volcanic Ash Soils. In: Volcanic Ash Soils - Genesis, Properties and Utilization, Shoji, S., R. Dahlgren, and M. Nanyo(eds). Amsterdam. Elsevier Science Publishers B.V. 21:1-5. doi:10.1016/s0166-2481(08)70262-9
- Sumner, M.E. 1993. Sodic soils; New perspectives. Australian Journal of Soil Research. 31:683-750. doi:10.1071/sr9930683
- Takadashi, T., and S. Shoji. 2002. Distribution and Classification of Volcanic Ash Soils. Global Environmental Research. 6:83-97.
- Teichert-Coddington, D.R., M. Peralta., and R. P. Phelps. 1989. Seepage Reduction in Tropical Fish Ponds Using Chicken Litter. Aquacultural Engineering. 8:147-154.
- Toirac C., J. 2008. El suelo-cemento como material de construcción. Ciencia y Sociedad. XXXIII: 520-571.
- Toth, S. J. 1949. Estimation of cation-exchange capacity and exchangeable Ca, K, and Na contents of soils by flame photometer techniques. Soil Science. 67:439-445.
- Ugolini, F.C., and R.A. Dahlgren. 2002. Soil Development in Volcanic Ash. Global Environmental Research. 6:69-81.
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers) .2004. General design and construction considerations for earth and rock-fill dams Eng Manual. 111 p.
- USDA (U.S. Department of Agriculture). 2012. Chapter 3, Engineering Classification of Earth Materials, National Engineering Handbook, Part 631. Washington, DC.

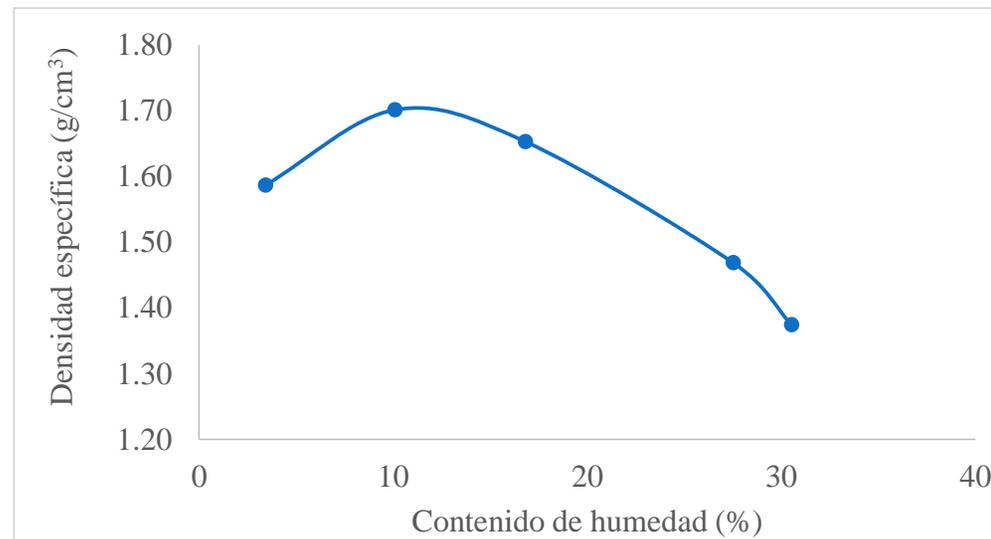
- Velde B. 1992. Introduction to Clay Minerals. Chemistry, Origins, Uses and Environmental Significance. First edition. Chapman and Hall, London. 205 p.
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37:29-38.
- Weil, R.R. and N.C. Brady. 2017. The nature and properties of soils. 15th edition. Pearson Education, England. 1104 p
- Wesley, L. 2003. Geotechnical Characterization and Behavior of Allophone Clays. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils.- Tan et al. (eds). Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Yarza de De la Torre., E. 2003. Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 50:220-234. Disponible:<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018846112003000100018&lng=es&nrm=iso>. Accedido el 20 mayo 2020.
- Yiasoumi, B. 2004. Leaking Farm Dams. Second edition. Agfact AC.24. The State of New South Wales NSW Department of Primary Industries.
- Yong, R. N., B.P. Warkentin., Y. Phadungchewit., and R. Gálvez. 1990. Buffer capacity and lead retention in some clay. Water, Air, and Soil Pollution. 53:53-672.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados obtenidos de laboratorio de la prueba de compactación próctor estándar

Peso cilindro* + tierra w=T+WH	T.humedad compactada WH(g)=w- T	Densidad húmeda (g/cm ³)	Tara (#)	Peso Tara	Tara + muestra húmeda	Tara + muestra seca	Peso agua(Ww)	Peso seco(Ws)	Contenido de agua en % w=100*Ww/Ws	Densidad seca (g/cm ³)
3570	1556.46	1.64	109	15.38	115.94	112.62	3.32	97.24	3.41	1.59
3790	1776.46	1.87	16	27.19	152.09	140.64	11.45	113.45	10.09	1.70
3845	1831.46	1.93	133	15.91	143.37	125.02	18.35	109.11	16.82	1.65
3790	1776.46	1.87	38	27.13	186.84	152.35	34.49	125.22	27.54	1.47
3715	1701.46	1.79	123	15.77	113.54	90.67	22.87	74.90	30.53	1.37

*Peso cilindro(T)=2013.54 g; volumen cilindro=948.58cm³; altura (h)=11.675 cm y diámetro (D)=10.171 cm.



Curva de compactación próctor Estándar

Anexo 2. Hoja de seguridad de los dispersantes utilizados

Sodio cloruro $\geq 99.0\%$ (by argentometric titration), en cristales, BAKER ANALYZED® ACS, J.T. Baker®

Proveedor: Avantor




Atención

Fórmula: NaCl
 MW: 58,44 g/mol
 Pto. Ebullición: 1413 °C (1013 hPa)
 Pto. de fusión: 801 °C
 Densidad: 2,16 g/cm³ (20 °C)
 Temperatura de almacenaje: Ambiente

Número MDL: MFCD00003477
 Núm. CAS: 7647-14-5
 UN: 0000

Resultados test especificaciones

Meets ACS Reagent Chemical Requirements	
For Laboratory, Research, or Manufacturing Use	
Assay (NaCl) (by Ag titrm)	$\geq 99.0\%$
pH of 5% Solution at 25°C	5.0 - 9.0
Insoluble Matter	$\leq 0.005\%$
Iodide (I)	$\leq 0.002\%$
Bromide (Br)	$\leq 0.01\%$
Chlorate and Nitrate (as NO ₃)	$\leq 0.003\%$
ACS - Phosphate (PO ₄)	≤ 5 ppm
Sulfate (SO ₄)	$\leq 0.004\%$
Barium (Ba)	Passes Test
ACS - Heavy Metals (as Pb)	≤ 5 ppm
Iron (Fe)	≤ 2 ppm
Calcium (Ca)	$\leq 0.002\%$
Magnesium (Mg)	$\leq 0.001\%$
Potassium (K)	$\leq 0.005\%$
Meets Reagent Specifications for testing USP/NF monographs	

CARBONATO DE SODIO ANHIDRO



QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V.
 Calle Pámpano No. 7, Col. Del Mar, Delegación Tláhuac
 C.P. 13270, Ciudad de México, México
 Tel.: 5859 8976 / 5859 8975 Fax: 5859 8976

Código: **HDS 2340**
 Revisión No.: **04**

Fecha de Elaboración: **28/11/2017**
 Fecha de Revisión: **20/08/2018**

CENACOM: 01 800 00 41 300 sin costo y (55) 55 50 15 52, (55) 55 50 14 96 en la Cd. de México.
 SETIQ: 01 800 00 214 00 sin costo, y (55) 55 59 15 88 en la Cd. de México.
 COATEA: 01 800 710 49 43 sin costo y (55) 26 15 20 45 y (55) 54 49 63 91 en la Cd. de México.

1 Identificación del producto

Nombre químico:	Sinónimos:	Fórmula:	Peso Molecular:	Familia Química:
CARBONATO DE SODIO ANHIDRO	CENIZA DE SODA, SODA ASH	Na₂CO₃	105.99	OXOANIONES

Uso recomendado:
Uso analítico.

Restricciones de uso del producto:
Sin datos disponibles.

2 Identificación de peligro o peligros

Peligros Físicos:
N/D

Peligros para la Salud:

H303 Toxicidad Aguda (Oral) - Categoría 5 - Puede ser nocivo en caso de ingestión.

H332 Toxicidad Aguda (Inhalación de polvos y nieblas) - Categoría 4 - Nocivo si se inhala.

H315 Corrosión/ irritación cutánea - Categoría 2 - Provoca irritación cutánea.

H319 Lesiones oculares graves / irritación ocular - Categoría 2A - Provoca irritación ocular grave

ELEMENTOS GHS [SISTEMA GLOBALMENTE ARMONIZADO]
 Identificador SGA (Consejos de Precaución):



FOSFATO DE SODIO TRIBÁSICO DODECAHIDRATADO



QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V.

Calle Pámpano No. 7, Col. Del Mar, Delegación Tláhuac
C.P. 13270, Ciudad de México, México
Tel.: 5859 8976 / 5859 8975 Fax: 5859 8976

Código:

HDS 2420

Revisión No.:

02

Fecha de Elaboración:

10/12/2017

Fecha de Revisión:

10/09/2018

CENACOM: 01 800 00 41 300 sin costo y (55) 55 50 15 52, (55) 55 50 14 96 en la Cd. de México.
SETIQ: 01 800 00 214 00 sin costo, y (55) 55 59 15 88 en la Cd. de México.
COATEA: 01 800 710 49 43 sin costo y (55) 26 15 20 45 y (55) 54 49 63 91 en la Cd. de México.

1 Identificación del producto

Nombre químico:	Sinónimos:	Fórmula:	Peso Molecular:	Familia Química:
FOSFATO DE SODIO TRIBÁSICO DODECAHIDRATADO	FOSFATO TRISODICO DODECAHIDRATADO	Na₃PO₄·12H₂O	380.13	OXOANIONES

Uso recomendado:

Uso analítico.

Restricciones de uso del producto:

Sin datos disponibles.

2 Identificación de peligro o peligros

Peligros Físicos:

N/D

Peligros para la Salud:

H315 Corrosión/Irritación cutánea – Categoría 2 – Provoca irritación cutánea.

H319 Lesiones oculares graves/irritación ocular – Categoría 2A - Provoca lesiones oculares graves.

H335 Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única - Categoría 3 - Puede irritar las vías respiratorias.

ELEMENTOS GHS [SISTEMA GLOBALMENTE ARMONIZADO]

Identificador SGA (Consejos de Precaución):



Palabras de advertencia: **Peligro.**

HIDRÓXIDO DE SODIO (ESCAMAS)



QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V.

Calle Pámpano No. 7, Col. Del Mar, Delegación Tláhuac
C.P. 13270, Ciudad de México, México
Tel.: 5859 8976 / 5859 8975 Fax: 5859 8976

Código:

HDS 2430

Revisión No.:

04

Fecha de Elaboración:

28/11/2017

Fecha de Revisión:

12/02/2018

CENACOM: 01 800 00 41 300 sin costo y (55) 55 50 15 52, (55) 55 50 14 96 en la Cd. de México.
SETIQ: 01 800 00 214 00 sin costo, y (55) 55 59 15 88 en la Cd. de México.
COATEA: 01 800 710 49 43 sin costo y (55) 26 15 20 45 y (55) 54 49 63 91 en la Cd. de México.

1 Identificación del producto

Nombre químico:	Sinónimos:	Fórmula:	Peso Molecular:	Familia Química:
HIDRÓXIDO DE SODIO	SOSA CAUSTICA SOSA LEJIA	NaOH	40.0	HIDRÓXIDOS

Uso recomendado:

Uso analítico.

Restricciones de uso del producto:

Sin datos disponibles.

2 Identificación de peligro o peligros

Peligros Físicos:

H290 Sustancias y mezclas corrosivas para los metales - Categoría 1 – Corrosivo para los metales.

Peligros para la Salud:

H314 Corrosión/Irritación cutánea – Categoría 1 – Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares.

H402 Lesiones oculares graves/irritación ocular - Categoría 1 – Provoca lesiones oculares graves.

ELEMENTOS GHS [SISTEMA GLOBALMENTE ARMONIZADO]

Identificador SGA (Consejos de Precaución):



Palabras de advertencia: **Peligro**

P234 Conservar únicamente en el recipiente original.

P260 No respirar el polvo o la niebla.

P264 Lavarse la piel concienzudamente tras la manipulación.

BENTONITA SODICA



QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V.

Calle Pámpano No. 7, Col. Del Mar, Delegación Tláhuac
C.P. 13270, Ciudad de México, México
Tel.: 5859 8976 / 5859 8975 Fax: 5859 8976

Código:

HDS 5702

Revisión No.:

02

Fecha de Elaboración:

28/11/2016

Fecha de Revisión:

10/01/2018

CENACOM: 01 800 00 41 300 sin costo y (55) 55 50 15 52, (55) 55 50 14 96 en la Cd. de México.
SETIQ: 01 800 00 214 00 sin costo, y (55) 55 59 15 88 en la Cd. de México.
COATEA: 01 800 710 49 43 sin costo y (55) 26 15 20 45 y (55) 54 49 63 91 en la Cd. de México.

1 Identificación del producto

Nombre químico:	Sinónimos:	Fórmula:	Peso Molecular:	Familia Química:
BENTONITA SODICA	N/D	N/D	N/D	N/D

Uso recomendado:

Uso analítico.

Restricciones de uso del producto:

Sin datos disponibles.

2 Identificación de peligro o peligros

Peligros Físicos:

N/D

Peligros para la Salud:

H316 Corrosión/Irritación cutánea – Categoría 3 – Provoca una leve irritación cutánea.

H320 Lesiones oculares graves/irritación ocular – Categoría 2B - Provoca irritación ocular.

ELEMENTOS GHS [SISTEMA GLOBALMENTE ARMONIZADO]
Identificador SGA (Consejos de Precaución):



Palabras de advertencia: **Atención.**

SILICATO DE SODIO



QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V.

Calle Pámpano No. 7, Col. Del Mar, Delegación Tláhuac
C.P. 13270, Ciudad de México, México
Tel.: 5859 8976 / 5859 8975 Fax: 5859 8976

Código:

HDS 6975

Revisión No.:

03

Fecha de Elaboración:

18/02/2018

Fecha de Revisión:

10/03/2019

CENACOM: 01 800 00 41 300 sin costo y (55) 55 50 15 52, (55) 55 50 14 96 en la Cd. de México.
SETIQ: 01 800 00 214 00 sin costo, y (55) 55 59 15 88 en la Cd. de México.
COATEA: 01 800 710 49 43 sin costo y (55) 26 15 20 45 y (55) 54 49 63 91 en la Cd. de México.

1 Identificación del producto

Nombre químico:	Sinónimos:	Fórmula:	Peso Molecular:	Familia Química:
SILICATO DE SODIO	SILICATO SODICO, VIDRIO SOLUBLE	C₂H₃NaO₃	160.10	N/D

Uso recomendado:

Uso analítico.

Restricciones de uso del producto:

Sin datos disponibles.

2 Identificación de peligro o peligros

Peligros Físicos:

N/D

Peligros para la Salud:

H302 Toxicidad aguda, Oral - Categoría 4 - Nocivo en caso de ingestión.

H319 Irritación ocular - Categoría 2A - Provoca irritación ocular grave.

ELEMENTOS GHS [SISTEMA GLOBALMENTE ARMONIZADO]

Identificador SGA (Consejos de Precaución):



Palabras de advertencia: **Atención**

P261 Evitar respirar el polvo/ el humo/ el gas/ la niebla/ los vapores/ el aerosol.

P264 Lavarse la piel concienzudamente después de la manipulación.

P270 No comer, beber o fumar mientras se manipula este producto.

P273 No dispersar en medio ambiente.

Anexo 3. Coeficiente de permeabilidad preliminar del tratamiento cemento-arena.

Fecha de realización	Tra t.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada (g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad(g cm ³)	Dosis arena(%)-cemento (%)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k (m día ⁻¹)	k (mm día ⁻¹)
01/08/2020	129	210.40	1113.50	903.10	577.27	1.56	15%-6%	17/08/2020	18/08/2020	0.3	50.00	8	0.16	0.004	0.00935	9.35
01/08/2020	130	207.40	1173.50	966.10	577.27	1.67	15%-8%	17/08/2020	18/08/2020	0.5	48.00	8	0.16	0.004	0.00599	5.99
01/08/2020	131	212.10	1146.60	934.50	577.27	1.62	15%-10%	17/08/2020	18/08/2020	0.5	36.00	8	0.16	0.004	0.00449	4.49
01/08/2020	132	220.00	1189.60	969.60	577.27	1.68	15%-12%	17/08/2020	18/08/2020	0.5	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00
03/08/2020	133	210.70	1156.00	945.30	577.27	1.64	20%-6%	17/08/2020	18/08/2020	0.5	29.00	8	0.16	0.004	0.00362	3.62
03/08/2020	134	209.50	1182.90	973.40	577.27	1.69	20%-8%	17/08/2020	18/08/2020	0.5	19.00	8	0.16	0.004	0.00237	2.37
03/08/2020	135	207.10	1156.50	949.40	577.27	1.64	20%-10%	17/08/2020	18/08/2020	0.5	1.50	8	0.16	0.004	0.00019	0.19
03/08/2020	136	214.50	1182.80	968.30	577.27	1.68	20%-12%	17/08/2020	18/08/2020	0.5	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00
05/08/2020	137	221.60	1171.60	950.00	577.27	1.65	25%-6%	18/08/2020	19/08/2020	1	80.00	8	0.16	0.004	0.00499	4.99
05/08/2020	138	215.00	1197.80	982.80	577.27	1.70	25%-8%	18/08/2020	19/08/2020	1	6.00	8	0.16	0.004	0.00037	0.37
05/08/2020	139	211.10	1186.60	975.50	577.27	1.69	25%-10%	18/08/2020	19/08/2020	1	27.00	8	0.16	0.004	0.00168	1.68
05/08/2020	140	216.10	1192.20	976.10	577.27	1.69	25%-12%	18/08/2020	19/08/2020	1	0.70	8	0.16	0.004	0.00004	0.04
08/08/2020	141	213.50	1176.60	963.10	577.27	1.67	30%-6%	18/08/2020	19/08/2020	1	125.00	8	0.16	0.004	0.00780	7.80
08/08/2020	142	209.70	1185.20	975.50	577.27	1.69	30%-8%	18/08/2020	19/08/2020	1	66.00	8	0.16	0.004	0.00412	4.12
08/08/2020	143	209.10	1181.80	972.70	577.27	1.69	30%-10%	18/08/2020	19/08/2020	1	12.00	8	0.16	0.004	0.00075	0.75
08/08/2020	144	207.30	1180.20	972.90	577.27	1.69	30%-12%	18/08/2020	19/08/2020	1	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00

Anexo 4. Primera y segunda etapa de las pruebas de permeabilidad

1. A) Gleyzación primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada(g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis estiércol y paja	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	Primer prueba k(mm día ⁻¹)
01/03/2020	1	178.50	1025.50	847.00	577.27	1.47	86%	10.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	135.00	8	0.15	0.004	0.0947	94.71
01/03/2020	2	179.40	1024.00	844.60	577.27	1.46	86%	10.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	250.00	8	0.14	0.004	0.1637	163.70
01/03/2020	3	236.30	1108.50	872.20	577.27	1.51	89%	10.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	82.00	8	0.14	0.004	0.0537	53.69
01/03/2020	4	178.70	1020.40	841.70	577.27	1.46	86%	10.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	26.00	8	0.14	0.004	0.0170	17.02
03/03/2020	5	183.20	1045.90	862.70	577.27	1.49	88%	20.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	132.00	8	0.15	0.004	0.0926	92.61
03/03/2020	6	186.90	1034.30	847.40	577.27	1.47	86%	20.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	75.00	8	0.15	0.004	0.0526	52.62
03/03/2020	7	238.90	1100.90	862.00	577.27	1.49	88%	20.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	38.00	8	0.16	0.004	0.0284	28.44
03/03/2020	8	236.10	1078.30	842.20	577.27	1.46	86%	20.00	15/08/2020	15/08/2020	0.08	40.00	8	0.16	0.004	0.0299	29.93
04/03/2020	9	181.20	1019.90	838.70	577.27	1.45	85%	30.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	56.00	8	0.16	0.004	0.0140	13.97
04/03/2020	10	240.10	1100.20	860.10	577.27	1.49	88%	30.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	73.00	8	0.16	0.004	0.0182	18.21
04/03/2020	11	182.30	1017.90	835.60	577.27	1.45	85%	30.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	58.00	8	0.17	0.004	0.0154	15.37
04/03/2020	12	238.80	1079.90	841.10	577.27	1.46	86%	30.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	36.00	8	0.16	0.004	0.0090	8.98
05/03/2020	13	200.10	1038.30	838.20	577.27	1.45	85%	40.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	52.00	8	0.17	0.004	0.0138	13.78
05/03/2020	14	211.60	1054.50	842.90	577.27	1.46	86%	40.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	32.00	8	0.17	0.004	0.0085	8.48
05/03/2020	15	190.10	1036.80	846.70	577.27	1.47	86%	40.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	5.00	8	0.17	0.004	0.0013	1.33
05/03/2020	16	188.50	1027.60	839.10	577.27	1.45	86%	40.00	15/08/2020	15/08/2020	0.25	30.00	8	0.17	0.004	0.0080	7.95

B) Gleyzación segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	1° Prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k(mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba k(mm día ⁻¹)	Promedio 2° Prueba k(mm día ⁻¹)
05/11/2020	05/11/2020	0.08	130.00	8	0.15	0.004	0.09121	94.71	91.21	10	82.28	80.75
05/11/2020	05/11/2020	0.08	240.00	8	0.14	0.004	0.15715	163.70	157.15	20	50.90	47.79
05/11/2020	05/11/2020	0.08	57.00	8	0.14	0.004	0.03732	53.69	37.32	30	14.13	11.82
05/11/2020	05/11/2020	0.08	57.00	8	0.14	0.004	0.03732	17.02	37.32	40	7.88	5.86
05/11/2020	05/11/2020	0.08	130.00	8	0.15	0.004	0.09121	92.61	91.21			
05/11/2020	05/11/2020	0.08	71.00	8	0.15	0.004	0.04981	52.62	49.81			
05/11/2020	05/11/2020	0.08	35.00	8	0.16	0.004	0.02619	28.44	26.19			
05/11/2020	05/11/2020	0.08	32.00	8	0.16	0.004	0.02395	29.93	23.95			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	46.00	8	0.16	0.004	0.01147	13.97	11.47			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	60.00	8	0.16	0.004	0.01497	18.21	14.97			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	56.00	8	0.17	0.004	0.01484	15.37	14.84			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	24.00	8	0.16	0.004	0.00599	8.98	5.99			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	46.00	8	0.17	0.004	0.01219	13.78	12.19			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	20.00	8	0.17	0.004	0.00530	8.48	5.30			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	2.50	8	0.17	0.004	0.00066	1.33	0.66			
05/11/2020	05/11/2020	0.25	20.00	8	0.17	0.004	0.00530	7.95	5.30			

2. A) Suelo-carbonato de sodio primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactada (g)	Peso tierra compactada(g)	Volumen cilindro(cm ³)	Densidad(g cm ⁻³)	Próctor(%)	Dosis carbonato de sodio(g)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	k(mm día ⁻¹)
13/10/2020	169	219.60	1178.20	958.60	577.27	1.66	98%	4	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00000
13/10/2020	170	249.40	1173.00	923.60	577.27	1.60	94%	4	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00000
13/10/2020	171	224.20	1164.90	940.70	577.27	1.63	96%	4	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00000
13/10/2020	172	235.30	1137.70	902.40	577.27	1.56	92%	4	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00000
04/05/2020	17	171.50	1103.10	931.60	577.27	1.61	95%	8	20/07/2020	22/07/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00000
04/05/2020	18	175.60	1076.80	901.20	577.27	1.56	92%	8	20/07/2020	22/07/2020	6	3.90	8	0.16	0.004	0.0000	0.00014
04/05/2020	19	236.90	1132.00	895.10	577.27	1.55	91%	8	20/07/2020	22/07/2020	6	0.80	8	0.16	0.004	0.0000	0.00003
04/05/2020	20	177.30	1064.80	887.50	577.27	1.54	90%	8	20/07/2020	22/07/2020	6	1.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00004
05/05/2020	21	239.90	1109.60	869.70	577.27	1.51	89%	12	20/07/2020	22/07/2020	6	6.10	8	0.16	0.004	0.0001	0.06340
05/05/2020	22	222.40	1123.80	901.40	577.27	1.56	92%	12	20/07/2020	22/07/2020	6	6.20	8	0.16	0.004	0.0001	0.06444
05/05/2020	23	178.50	1069.20	890.70	577.27	1.54	91%	12	20/07/2020	22/07/2020	6	5.90	8	0.16	0.004	0.0001	0.06132
05/05/2020	24	230.30	1075.80	845.50	577.27	1.46	86%	12	20/07/2020	22/07/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.05197
06/05/2020	25	181.80	1076.40	894.60	577.27	1.55	91%	16	22/07/2020	24/07/2020	6	12.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.12473
06/05/2020	26	240.90	1140.50	899.60	577.27	1.56	92%	16	22/07/2020	24/07/2020	6	12.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.12473
06/05/2020	27	182.70	1068.80	886.10	577.27	1.53	90%	16	22/07/2020	24/07/2020	6	10.70	8	0.16	0.004	0.0001	0.11121
06/05/2020	28	239.10	1113.80	874.70	577.27	1.52	89%	16	22/07/2020	24/07/2020	6	9.40	8	0.16	0.004	0.0001	0.09770
07/05/2020	29	233.00	1136.00	903.00	577.27	1.56	92%	20	22/07/2020	24/07/2020	6	16.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.16630
07/05/2020	30	189.30	1086.00	896.70	577.27	1.55	91%	20	22/07/2020	24/07/2020	6	12.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.12473
07/05/2020	31	184.90	1070.40	885.50	577.27	1.53	90%	20	22/07/2020	24/07/2020	6	13.40	8	0.16	0.004	0.0001	0.13928
07/05/2020	32	166.40	1067.40	901.00	577.27	1.56	92%	20	22/07/2020	24/07/2020	6	9.40	8	0.16	0.004	0.0001	0.09770

B) Suelo-carbonato de sodio segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	1° Prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k(mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba	Promedio 2° Prueba
04/12/2020	06/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00000	4	0.00	0.00
04/12/2020	06/12/2020	6	0.20	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00001	8	0.00	0.00
04/12/2020	06/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00000	12	0.06	0.02
04/12/2020	06/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00000	16	0.11	0.04
13/10/2020	15/08/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00000	20	0.13	0.02
13/10/2020	15/08/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00000			
13/10/2020	15/08/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00000			
13/10/2020	15/08/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00000			
13/10/2020	15/08/2020	6	2.84	8	0.16	0.004	0.00003	0.06	0.03			
13/10/2020	15/08/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.06	0.00			
13/10/2020	15/08/2020	6	3.14	8	0.16	0.004	0.00003	0.06	0.03			
13/10/2020	15/08/2020	6	3.50	8	0.16	0.004	0.00004	0.05	0.04			
15/10/2020	18/10/2020	6	2.10	8	0.16	0.004	0.00002	0.12	0.02			
15/10/2020	18/10/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.00006	0.12	0.06			
15/10/2020	18/10/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.00006	0.11	0.06			
15/10/2020	18/10/2020	6	2.60	8	0.16	0.004	0.00003	0.10	0.03			
15/10/2020	18/10/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.17	0.00			
15/10/2020	18/10/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.12	0.00			
15/10/2020	18/10/2020	6	1.80	8	0.16	0.004	0.00002	0.14	0.02			
15/10/2020	18/10/2020	6	7.70	8	0.16	0.004	0.00008	0.10	0.08			

3. A) Suelo-tripolifosfato de sodio primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada(g)	Volumen cilindro(cm ³)	Densidad(g cm ⁻³)	Próctor(%)	Dosis tripolifosfato de sodio (g)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k (m día ⁻¹)	k(mm día ⁻¹)
13/10/2020	173	237.10	1135.40	898.30	577.27	1.56	92%	6	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
13/10/2020	174	224.50	1099.30	874.80	577.27	1.52	89%	6	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
13/10/2020	175	236.20	1136.90	900.70	577.27	1.56	92%	6	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
13/10/2020	176	208.70	1096.80	888.10	577.27	1.54	90%	6	09/11/2020	11/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
09/05/2020	33	177.60	1081.20	903.60	577.27	1.57	92%	10	10/08/2020	11/08/2020	6	0.20	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
17/07/2020	34	217.80	1114.40	896.60	577.27	1.55	91%	10	10/08/2020	11/08/2020	6	0.88	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
09/05/2020	35	211.30	1116.10	904.80	577.27	1.57	92%	10	10/08/2020	11/08/2020	6	0.44	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
17/08/2020	36	209.00	1083.30	874.30	577.27	1.51	89%	10	12/08/2020	13/08/2020	6	1.40	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
09/05/2020	37	191.30	1089.70	898.40	577.27	1.56	92%	14	12/08/2020	13/08/2020	6	0.40	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
17/08/2020	38	202.30	1111.60	909.30	577.27	1.58	93%	14	12/08/2020	13/08/2020	6	2.40	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
20/07/2020	39	148.50	1079.10	930.60	577.27	1.61	95%	14	12/08/2020	13/08/2020	6	1.80	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
20/07/2020	40	208.00	1123.70	915.70	577.27	1.59	93%	14	12/08/2020	13/08/2020	6	0.20	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
10/05/2020	41	195.20	1082.90	887.70	577.27	1.54	90%	18	12/08/2020	13/08/2020	6	18.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.19
10/05/2020	42	205.30	1099.40	894.10	577.27	1.55	91%	18	12/08/2020	13/08/2020	6	0.80	8	0.16	0.004	0.0000	0.01
10/05/2020	43	261.80	1168.00	906.20	577.27	1.57	92%	18	12/08/2020	13/08/2020	6	0.60	8	0.16	0.004	0.0000	0.01
10/05/2020	44	195.40	1072.30	876.90	577.27	1.52	89%	18	13/08/2020	14/08/2020	6	8.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.08
11/05/2020	45	200.70	1087.80	887.10	577.27	1.54	90%	22	13/08/2020	14/08/2020	6	24.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.25
01/08/2020	46	210.10	1118.20	908.10	577.27	1.57	93%	22	13/08/2020	14/08/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
11/05/2020	47	190.90	1112.10	921.20	577.27	1.60	94%	22	13/08/2020	14/08/2020	6	3.20	8	0.16	0.004	0.0000	0.03
11/05/2020	48	189.10	1068.70	879.60	577.27	1.52	90%	22	13/08/2020	14/08/2020	6	3.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.03

B) Suelo-tripolifosfato de sodio segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k (m día ⁻¹)	1° Prueba k (mm día ⁻¹)	2° prueba k (mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba	Promedio 2° Prueba
04/12/2020	06/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00000	0.00000	6	0.00	0.00
04/12/2020	06/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00000	0.00000	10	0.00	0.00
04/12/2020	06/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00000	0.00000	14	0.01	0.01
04/12/2020	06/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00000	0.00000	18	0.07	0.04
22/10/2020	23/10/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00001	0.00022	22	0.08	0.07
22/10/2020	23/10/2020	6	1.30	8	0.16	0.004	0.00000	0.00003	0.00005			
22/10/2020	23/10/2020	6	1.50	8	0.16	0.004	0.00000	0.00002	0.00005			
22/10/2020	23/10/2020	6	0.90	8	0.16	0.004	0.00000	0.00005	0.00003			
22/10/2020	23/10/2020	6	2.00	8	0.16	0.004	0.00002	0.00416	0.02079			
22/10/2020	23/10/2020	6	0.80	8	0.16	0.004	0.00001	0.02495	0.00832			
22/10/2020	23/10/2020	6	2.00	8	0.16	0.004	0.00002	0.01871	0.02079			
22/10/2020	23/10/2020	6	0.60	8	0.16	0.004	0.00001	0.00208	0.00624			
23/10/2020	24/10/2020	6	2.20	8	0.16	0.004	0.00002	0.18709	0.02287			
23/10/2020	24/10/2020	6	1.00	8	0.16	0.004	0.00001	0.00832	0.01039			
23/10/2020	24/10/2020	6	1.30	8	0.16	0.004	0.00001	0.00624	0.01351			
23/10/2020	24/10/2020	6	10.00	8	0.16	0.004	0.00010	0.08315	0.10394			
23/10/2020	24/10/2020	6	11.00	8	0.16	0.004	0.00011	0.24945	0.11433			
23/10/2020	24/10/2020	6	0.20	8	0.16	0.004	0.00000	0.00000	0.00208			
23/10/2020	24/10/2020	6	9.00	8	0.16	0.004	0.00009	0.03326	0.09354			
23/10/2020	24/10/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.00005	0.03118	0.05197			

4. A) Suelo-fosfato de sodio primera prueba

Fecha de realización	Núm Trátam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado (g)	Peso tierra compactada (g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis fosfato de sodio (g)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen (ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	K (m día ⁻¹)	K (mm día ⁻¹)
13/10/2020	177	204.70	1159.00	954.30	577.27	1.65	97%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
13/10/2020	178	239.50	1128.30	888.80	577.27	1.54	91%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
13/10/2020	179	213.40	1145.00	931.60	577.27	1.61	95%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
13/10/2020	180	215.60	1176.50	960.90	577.27	1.66	98%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.00
13/05/2020	49	196.40	1093.80	897.40	577.27	1.55	91%	8	30/06/2020	02/07/2020	6	13.40	8	0.16	0.004	0.0001	0.14
13/05/2020	50	193.30	1104.30	911.00	577.27	1.58	93%	8	30/06/2020	02/07/2020	6	4.20	8	0.16	0.004	0.0000	0.04
13/05/2020	51	201.40	1077.90	876.50	577.27	1.52	89%	8	30/06/2020	02/07/2020	6	0.80	8	0.16	0.004	0.0000	0.01
13/05/2020	52	203.60	1106.50	902.90	577.27	1.56	92%	8	30/06/2020	02/07/2020	6	3.20	8	0.16	0.004	0.0000	0.03
14/05/2020	53	201.30	1100.40	899.10	577.27	1.56	92%	12	02/07/2020	03/07/2020	6	0.60	8	0.16	0.004	0.0000	0.01
14/05/2020	54	198.80	1086.80	888.00	577.27	1.54	90%	12	02/07/2020	03/07/2020	6	1.40	8	0.16	0.004	0.0000	0.01
14/05/2020	55	202.20	1101.00	898.80	577.27	1.56	92%	12	02/07/2020	03/07/2020	6	2.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
14/05/2020	56	206.10	1092.70	886.60	577.27	1.54	90%	12	02/07/2020	03/07/2020	6	2.40	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
15/05/2020	57	198.80	1038.40	839.60	577.27	1.45	86%	16	02/07/2020	03/07/2020	6	6.20	8	0.16	0.004	0.0001	0.06
15/05/2020	58	196.20	1085.00	888.80	577.27	1.54	91%	16	02/07/2020	03/07/2020	6	2.40	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
15/05/2020	59	213.80	1115.20	901.40	577.27	1.56	92%	16	02/07/2020	03/07/2020	6	0.80	8	0.16	0.004	0.0000	0.01
15/05/2020	60	196.80	1097.70	900.90	577.27	1.56	92%	16	02/07/2020	03/07/2020	6	1.60	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
16/05/2020	61	203.10	1099.40	896.30	577.27	1.55	91%	20	02/07/2020	03/07/2020	6	6.20	8	0.16	0.004	0.0001	0.06
16/05/2020	62	201.10	1108.40	907.30	577.27	1.57	92%	20	02/07/2020	03/07/2020	6	2.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
16/05/2020	63	211.80	1122.60	910.80	577.27	1.58	93%	20	02/07/2020	03/07/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.05
16/05/2020	64	204.90	1086.40	881.50	577.27	1.53	90%	20	02/07/2020	03/07/2020	6	0.60	8	0.16	0.004	0.0000	0.01

B) Suelo-fosfato de sodio segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	1° Prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k(mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba	Promedio 2° Prueba
08/12/2020	10/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00	6	0.00	0.00
08/12/2020	10/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00	8	0.06	0.05
08/12/2020	10/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00	12	0.02	0.01
08/12/2020	10/12/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.00	0.00	16	0.03	0.01
08/09/2020	09/09/2020	6	2.50	8	0.16	0.004	0.00003	0.14	0.03	20	0.04	0.01
08/09/2020	09/09/2020	6	1.50	8	0.16	0.004	0.00002	0.04	0.02			
08/09/2020	09/09/2020	6	15.00	8	0.16	0.004	0.00016	0.01	0.16			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.10	8	0.16	0.004	0.00000	0.03	0.00			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.01	0.00			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.50	8	0.16	0.004	0.00001	0.01	0.01			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.02	0.00			
08/09/2020	09/09/2020	6	2.50	8	0.16	0.004	0.00003	0.02	0.03			
08/09/2020	09/09/2020	6	1.35	8	0.16	0.004	0.00001	0.06	0.01			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.83	8	0.16	0.004	0.00001	0.02	0.01			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.82	8	0.16	0.004	0.00001	0.01	0.01			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.02	0.00			
08/09/2020	09/09/2020	6	1.90	8	0.16	0.004	0.00002	0.06	0.02			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.02	0.00			
08/09/2020	09/09/2020	6	2.80	8	0.16	0.004	0.00003	0.05	0.03			
08/09/2020	09/09/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.01	0.00			

5. A) Suelo-silicato de sodio primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada(g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis silicato de sodio (g)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k (m día ⁻¹)	k (mm día ⁻¹)
13/10/2020	181	208.10	1154.70	946.60	577.27	1.64	96%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	2.40	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
13/10/2020	182	213.20	1158.70	945.50	577.27	1.64	96%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	29.60	8	0.16	0.004	0.0003	0.31
13/10/2020	183	218.00	1155.70	937.70	577.27	1.62	96%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	10.40	8	0.16	0.004	0.0001	0.11
13/10/2020	184	212.30	1119.30	907.00	577.27	1.57	92%	6	13/11/2020	15/11/2020	6	19.20	8	0.16	0.004	0.0002	0.20
22/05/2020	65	269.90	1181.90	912.00	577.27	1.58	93%	8	07/07/2020	08/07/2020	6	9.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.09
22/05/2020	66	204.40	1104.00	899.60	577.27	1.56	92%	8	07/07/2020	08/07/2020	6	17.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.18
22/05/2020	67	265.00	1164.50	899.50	577.27	1.56	92%	8	07/07/2020	08/07/2020	6	29.00	8	0.16	0.004	0.0003	0.30
22/05/2020	68	257.80	1142.40	884.60	577.27	1.53	90%	8	07/07/2020	08/07/2020	6	19.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.20
25/05/2020	69	204.50	1122.70	918.20	577.27	1.59	94%	12	07/07/2020	08/07/2020	6	14.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.15
25/05/2020	70	207.00	1097.30	890.30	577.27	1.54	91%	12	07/07/2020	08/07/2020	6	14.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.15
25/05/2020	71	197.90	1110.70	912.80	577.27	1.58	93%	12	07/07/2020	08/07/2020	6	13.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.14
25/05/2020	72	198.90	1103.80	904.90	577.27	1.57	92%	12	06/07/2020	07/07/2020	6	48.00	8	0.16	0.004	0.0005	0.50
26/05/2020	73	189.40	1097.60	908.20	577.27	1.57	93%	16	06/07/2020	07/07/2020	6	84.00	8	0.16	0.004	0.0009	0.87
26/05/2020	74	213.90	1109.30	895.40	577.27	1.55	91%	16	06/07/2020	07/07/2020	6	102.00	8	0.16	0.004	0.0011	1.06
28/05/2020	75	209.40	1088.50	879.10	577.27	1.52	90%	16	06/07/2020	07/07/2020	6	78.00	8	0.16	0.004	0.0008	0.81
28/05/2020	76	204.90	1126.50	921.60	577.27	1.60	94%	16	06/07/2020	07/07/2020	6	36.00	8	0.16	0.004	0.0004	0.37
29/05/2020	77	196.40	1106.40	910.00	577.27	1.58	93%	20	06/07/2020	07/07/2020	6	42.00	8	0.16	0.004	0.0004	0.44
29/05/2020	78	194.60	1091.40	896.80	577.27	1.55	91%	20	07/07/2020	08/07/2020	6	22.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.23
29/05/2020	79	206.60	1056.40	849.80	577.27	1.47	87%	20	07/07/2020	08/07/2020	3	30.00	8	0.16	0.004	0.0006	0.62
29/05/2020	80	203.40	1102.80	899.40	577.27	1.56	92%	20	06/07/2020	07/07/2020	3	8.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.17

B) Suelo-silicato de sodio segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m/día)	1° Prueba k (mm día ⁻¹)	2° prueba k(mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba	Promedio 2° Prueba
08/12/2020	10/12/2020	6	1.50	8	0.16	0.004	0.00000	0.02	0.02	6	0.16	0.05
08/12/2020	10/12/2020	6	4.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.31	0.04	8	0.19	0.15
08/12/2020	10/12/2020	6	8.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.11	0.08	12	0.23	0.14
08/12/2020	10/12/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.20	0.05	16	0.78	0.30
06/10/2020	08/10/2020	6	12.00	8	0.16	0.004	0.00012	0.09	0.12	20	0.36	0.13
06/10/2020	08/10/2020	6	10.00	8	0.16	0.004	0.00010	0.18	0.10			
06/10/2020	08/10/2020	6	13.00	8	0.16	0.004	0.00014	0.30	0.14			
06/10/2020	08/10/2020	6	22.00	8	0.16	0.004	0.00023	0.20	0.23			
06/10/2020	08/10/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.00005	0.15	0.05			
06/10/2020	08/10/2020	6	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.15	0.00			
06/10/2020	08/10/2020	6	15.00	8	0.16	0.004	0.00016	0.14	0.16			
06/10/2020	08/10/2020	6	35.00	8	0.16	0.004	0.00036	0.50	0.36			
08/10/2020	10/10/2020	6	17.00	8	0.16	0.004	0.00018	0.87	0.18			
08/10/2020	10/10/2020	6	18.00	8	0.16	0.004	0.00019	1.06	0.19			
08/10/2020	10/10/2020	6	67.00	8	0.16	0.004	0.00070	0.81	0.70			
08/10/2020	10/10/2020	6	13.00	8	0.16	0.004	0.00014	0.37	0.14			
08/10/2020	10/10/2020	6	18.00	8	0.16	0.004	0.00019	0.44	0.19			
08/10/2020	10/10/2020	6	10.00	8	0.16	0.004	0.00010	0.23	0.10			
08/10/2020	10/10/2020	6	16.00	8	0.16	0.004	0.00017	0.62	0.17			
08/10/2020	10/10/2020	6	7.14	8	0.16	0.004	0.00007	0.17	0.07			

6. A) Suelo-cloruro de sodio primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada(g)	Volumen cilindro(cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis cloruro de sodio(g)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen (mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	K (m día ⁻¹)	Primer prueba k(mm día ⁻¹)
30/04/2020	81	242.60	1124.00	881.40	577.27	1.53	90%	8	13/07/2020	14/07/2020	2	15.00	8	0.16	0.004	0.0005	0.47
30/04/2020	82	237.50	1103.90	866.40	577.27	1.50	88%	8	13/07/2020	14/07/2020	2	15.00	8	0.16	0.004	0.0005	0.47
30/04/2020	83	230.30	1100.00	869.70	577.27	1.51	89%	8	13/07/2020	14/07/2020	2	23.00	8	0.16	0.004	0.0007	0.72
30/04/2020	84	233.40	1130.00	896.60	577.27	1.55	91%	8	13/07/2020	14/07/2020	2	15.00	8	0.16	0.004	0.0005	0.47
01/05/2020	85	193.70	1083.90	890.20	577.27	1.54	91%	12	13/07/2020	14/07/2020	2	10.00	8	0.16	0.004	0.0003	0.31
01/05/2020	86	232.80	1132.70	899.90	577.27	1.56	92%	12	15/07/2020	16/07/2020	2	12.00	8	0.16	0.004	0.0004	0.37
01/05/2020	87	237.50	1147.00	909.50	577.27	1.58	93%	12	15/07/2020	16/07/2020	2	10.00	8	0.16	0.004	0.0003	0.31
01/05/2020	88	179.90	1074.00	894.10	577.27	1.55	91%	12	15/07/2020	16/07/2020	2	20.00	8	0.16	0.004	0.0006	0.62
01/05/2020	89	192.80	1106.10	913.30	577.27	1.58	93%	16	15/07/2020	16/07/2020	2	8.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.25
01/05/2020	90	183.20	1087.50	904.30	577.27	1.57	92%	16	15/07/2020	16/07/2020	2	8.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.25
02/05/2020	91	194.80	1089.30	894.50	577.27	1.55	91%	16	15/07/2020	16/07/2020	2	13.00	8	0.16	0.004	0.0004	0.41
02/05/2020	92	183.10	1074.80	891.70	577.27	1.54	91%	16	15/07/2020	16/07/2020	2	6.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.19
02/05/2020	93	194.40	1107.70	913.30	577.27	1.58	93%	20	15/07/2020	16/07/2020	2	6.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.19
02/05/2020	94	182.80	1103.60	920.80	577.27	1.60	94%	20	15/07/2020	16/07/2020	2	22.00	8	0.16	0.004	0.0007	0.69
03/05/2020	95	193.10	1108.40	915.30	577.27	1.59	93%	20	15/07/2020	16/07/2020	2	15.00	8	0.16	0.004	0.0005	0.47
03/05/2020	96	190.50	1052.80	862.30	577.27	1.49	88%	20	15/07/2020	16/07/2020	2	15.00	8	0.16	0.004	0.0005	0.47

B) Suelo-cloruro de sodio segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	1° Prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k k(mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba k(mm día ⁻¹)	Promedio 2° Prueba k(mm día ⁻¹)
24/09/2020	25/09/2020	2	2.25	8	0.16	0.004	0.00007	0.47	0.07	8.00	0.53	0.08
24/09/2020	25/09/2020	2	1.75	8	0.16	0.004	0.00005	0.47	0.05	12.00	0.41	0.05
24/09/2020	25/09/2020	2	3.50	8	0.16	0.004	0.00011	0.72	0.11	16.00	0.27	0.03
24/09/2020	25/09/2020	2	3.20	8	0.16	0.004	0.00010	0.47	0.10	20.00	0.45	0.03
24/09/2020	24/09/2020	2	2.00	8	0.16	0.004	0.00006	0.31	0.06			
24/09/2020	24/09/2020	2	3.00	8	0.16	0.004	0.00009	0.37	0.09			
24/09/2020	24/09/2020	2	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.31	0.00			
24/09/2020	24/09/2020	2	1.50	8	0.16	0.004	0.00005	0.62	0.05			
25/09/2020	26/09/2020	2	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.25	0.00			
25/09/2020	26/09/2020	2	2.50	8	0.16	0.004	0.00008	0.25	0.08			
25/09/2020	26/09/2020	2	1.50	8	0.16	0.004	0.00005	0.41	0.05			
25/09/2020	26/09/2020	2	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.19	0.00			
25/09/2020	26/09/2020	2	3.70	8	0.16	0.004	0.00012	0.19	0.12			
25/09/2020	26/09/2020	2	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.69	0.00			
25/09/2020	26/09/2020	2	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.47	0.00			
25/09/2020	26/09/2020	2	0.00	8	0.16	0.004	0.00000	0.47	0.00			

7. A) Suelo-hidróxido de sodio primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada(g)	Volumen cilindro(cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis hidróxido de sodio(g)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen (mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	K (m día ⁻¹)	Primer prueba k(mm día ⁻¹)
18/05/2020	97	255.40	1196.40	941.00	577.27	1.63	96%	4	29/07/2020	01/08/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.05
18/05/2020	98	212.40	1087.90	875.50	577.27	1.52	89%	4	29/07/2020	01/08/2020	6	2.00	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
18/05/2020	99	205.50	1103.20	897.70	577.27	1.56	91%	4	29/07/2020	01/08/2020	6	3.50	8	0.16	0.004	0.0000	0.04
18/05/2020	100	206.10	1106.40	900.30	577.27	1.56	92%	4	29/07/2020	01/08/2020	6	3.20	8	0.16	0.004	0.0000	0.03
19/05/2020	101	187.30	1097.80	910.50	577.27	1.58	93%	8	29/07/2020	01/08/2020	6	3.20	8	0.16	0.004	0.0000	0.03
19/05/2020	102	209.30	1104.70	895.40	577.27	1.55	91%	8	29/07/2020	01/08/2020	6	5.50	8	0.16	0.004	0.0001	0.06
19/05/2020	103	196.80	1124.90	928.10	577.27	1.61	95%	8	29/07/2020	01/08/2020	6	1.60	8	0.16	0.004	0.0000	0.02
19/05/2020	104	207.60	1127.70	920.10	577.27	1.59	94%	8	29/07/2020	01/08/2020	6	4.50	8	0.16	0.004	0.0000	0.05
20/05/2020	105	205.40	1088.20	882.80	577.27	1.53	90%	12	01/08/2020	04/08/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.06
20/05/2020	106	262.20	1156.60	894.40	577.27	1.55	91%	12	01/08/2020	04/08/2020	6	8.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.08
20/05/2020	107	201.70	1088.00	886.30	577.27	1.54	90%	12	01/08/2020	04/08/2020	6	9.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.09
20/05/2020	108	206.10	1094.00	887.90	577.27	1.54	90%	12	01/08/2020	04/08/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.06
21/05/2020	109	209.40	1081.40	872.00	577.27	1.51	89%	16	01/08/2020	04/08/2020	6	8.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.08
21/05/2020	110	254.10	1120.70	866.60	577.27	1.50	88%	16	01/08/2020	04/08/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.06
21/05/2020	111	199.10	1115.30	916.20	577.27	1.59	93%	16	01/08/2020	04/08/2020	6	9.00	8	0.16	0.004	0.0001	0.09
21/05/2020	112	195.80	1101.40	905.60	577.27	1.57	92%	16	01/08/2020	04/08/2020	6	19.00	8	0.16	0.004	0.0002	0.20

B) Suelo-hidróxido de sodio segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	K (m día ⁻¹)	1° Prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k (mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba k(mm día ⁻¹)	Promedio 2° Prueba k(mm día ⁻¹)
18/10/2020	18/10/2020	6	2.10	8	0.16	0.004	0.00002	0.05	0.02	4	0.04	0.02
18/10/2020	18/10/2020	6	1.30	8	0.16	0.004	0.00001	0.02	0.01	8	0.04	0.03
18/10/2020	18/10/2020	6	1.20	8	0.16	0.004	0.00001	0.04	0.01	12	0.08	0.06
19/10/2020	19/10/2020	6	1.20	8	0.16	0.004	0.00001	0.03	0.01	16	0.11	0.10
19/10/2020	19/10/2020	6	0.90	8	0.16	0.004	0.00001	0.03	0.01			
19/10/2020	19/10/2020	6	3.70	8	0.16	0.004	0.00004	0.06	0.04			
19/10/2020	19/10/2020	6	0.50	8	0.16	0.004	0.00001	0.02	0.01			
19/10/2020	19/10/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.00005	0.05	0.05			
20/10/2020	20/10/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.00005	0.06	0.05			
20/10/2020	20/10/2020	6	8.00	8	0.16	0.004	0.00008	0.08	0.08			
20/10/2020	20/10/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.00006	0.09	0.06			
20/10/2020	20/10/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.00005	0.06	0.05			
20/10/2020	20/10/2020	6	10.00	8	0.16	0.004	0.00010	0.08	0.10			
20/10/2020	20/10/2020	6	6.00	8	0.16	0.004	0.00006	0.06	0.06			
20/10/2020	20/10/2020	6	12.00	8	0.16	0.004	0.00012	0.09	0.12			
20/10/2020	20/10/2020	6	12.00	8	0.16	0.004	0.00012	0.20	0.12			

8. A) Suelo-bentonita sódica primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada (g)	Volumen cilindro(cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis bentonita (g)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen (mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	K (m día ⁻¹)	Primer prueba k(mm día ⁻¹)
22/05/2020	113	200.70	1120.70	920.00	577.27	1.59	94%	15	09/07/2020	10/07/2020	3	78	8	0.16	0.004	0.0016	1.62
22/05/2020	114	199.40	1093.50	894.10	577.27	1.55	91%	15	09/07/2020	10/07/2020	3	90	8	0.16	0.004	0.0019	1.87
22/05/2020	115	199.10	1067.60	868.50	577.27	1.50	88%	15	09/07/2020	10/07/2020	3	87	8	0.16	0.004	0.0018	1.81
22/05/2020	116	193.90	1086.40	892.50	577.27	1.55	91%	15	09/07/2020	10/07/2020	3	50	8	0.16	0.004	0.0010	1.04
25/05/2020	117	201.90	1118.10	916.20	577.27	1.59	93%	30	09/07/2020	10/07/2020	3	18	8	0.16	0.004	0.0004	0.37
25/05/2020	118	204.80	1111.10	906.30	577.27	1.57	92%	30	11/07/2020	12/07/2020	3	51	8	0.16	0.004	0.0011	1.06
25/05/2020	119	199.50	1128.40	928.90	577.27	1.61	95%	30	11/07/2020	12/07/2020	3	100	8	0.16	0.004	0.0021	2.08
25/05/2020	120	196.60	1112.00	915.40	577.27	1.59	93%	30	11/07/2020	12/07/2020	3	71	8	0.16	0.004	0.0015	1.48
26/05/2020	121	248.90	1137.00	888.10	577.27	1.54	90%	45	11/07/2020	12/07/2020	3	26	8	0.16	0.004	0.0005	0.54
26/05/2020	122	213.30	1081.10	867.80	577.27	1.50	88%	45	11/07/2020	12/07/2020	3	12	8	0.16	0.004	0.0002	0.25
28/05/2020	123	208.30	1074.00	865.70	577.27	1.50	88%	45	11/07/2020	12/07/2020	3	15	8	0.16	0.004	0.0003	0.31
28/05/2020	124	207.70	1069.10	861.40	577.27	1.49	88%	45	11/07/2020	12/07/2020	3	15	8	0.16	0.004	0.0003	0.31
29/05/2020	125	211.40	1140.10	928.70	577.27	1.61	95%	60	11/07/2020	12/07/2020	3	4	8	0.16	0.004	0.0001	0.08
29/05/2020	126	216.40	1092.80	876.40	577.27	1.52	89%	60	11/07/2020	12/07/2020	3	5	8	0.16	0.004	0.0001	0.10
29/05/2020	127	200.10	1077.20	877.10	577.27	1.52	89%	60	11/07/2020	12/07/2020	3	10	8	0.16	0.004	0.0002	0.21
29/05/2020	128	212.60	1097.10	884.50	577.27	1.53	90%	60	11/07/2020	12/07/2020	3	19	8	0.16	0.004	0.0004	0.39

B) Tratamiento suelo-bentonita sódica segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	1° Prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k(mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba k (mm día ⁻¹)	Promedio 2° Prueba k (mm día ⁻¹)
10/09/2020	10/09/2020	3	24	8	0.16	0.004	0.00050	1.62	0.50	15	1.59	0.97
10/09/2020	10/09/2020	3	37	8	0.16	0.004	0.00077	1.87	0.77	30	1.25	1.23
10/09/2020	10/09/2020	3	100	8	0.16	0.004	0.00208	1.81	2.08	45	0.35	0.22
10/09/2020	10/09/2020	3	25	8	0.16	0.004	0.00052	1.04	0.52	60	0.20	0.12
10/09/2020	10/09/2020	3	10	8	0.16	0.004	0.00021	0.37	0.21			
10/09/2020	10/09/2020	3	154	8	0.16	0.004	0.00320	1.06	3.20			
10/09/2020	10/09/2020	3	36	8	0.16	0.004	0.00075	2.08	0.75			
10/09/2020	10/09/2020	3	37	8	0.16	0.004	0.00077	1.48	0.77			
23/09/2020	23/09/2020	3	13	8	0.16	0.004	0.00027	0.54	0.27			
23/09/2020	23/09/2020	3	11	8	0.16	0.004	0.00023	0.25	0.23			
23/09/2020	23/09/2020	3	10	8	0.16	0.004	0.00021	0.31	0.21			
23/09/2020	23/09/2020	3	8	8	0.16	0.004	0.00017	0.31	0.17			
23/09/2020	23/09/2020	3	5	8	0.16	0.004	0.00010	0.08	0.10			
23/09/2020	23/09/2020	3	2	8	0.16	0.004	0.00004	0.10	0.04			
23/09/2020	23/09/2020	3	5	8	0.16	0.004	0.00010	0.21	0.10			
23/09/2020	23/09/2020	3	11	8	0.16	0.004	0.00023	0.39	0.23			

9. Tratamiento suelo-cemento-arena

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado (g)	Peso tierra compactada (g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis arena(%)-cemento (12%)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen (mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k (m día ⁻¹)	Primer prueba k(mm día ⁻¹)
07/10/2020	129	211.50	1184.90	973.40	577.27	1.69	99%	10.00	25/10/2020	26/10/2020	6	3.50	8	0.16	0.004	0.00004	0.04
07/10/2020	130	217.40	1194.10	976.70	577.27	1.69	100%	10.00	25/10/2020	26/10/2020	6	11.00	8	0.16	0.004	0.00011	0.11
07/10/2020	131	211.30	1161.00	949.70	577.27	1.65	97%	10.00	25/10/2020	26/10/2020	6	0.90	8	0.16	0.004	0.00001	0.01
07/10/2020	132	217.40	1187.70	970.30	577.27	1.68	99%	10.00	25/10/2020	26/10/2020	6	13.00	8	0.16	0.004	0.00014	0.14
08/10/2020	133	215.90	1149.10	933.20	577.27	1.62	95%	12.00	25/10/2020	26/10/2020	6	8.50	8	0.16	0.004	0.00009	0.09
08/10/2020	134	214.70	1178.90	964.20	577.27	1.67	98%	12.00	25/10/2020	26/10/2020	6	15.00	8	0.16	0.004	0.00016	0.16
08/10/2020	135	223.00	1170.60	947.60	577.27	1.64	97%	12.00	25/10/2020	26/10/2020	6	25.00	8	0.16	0.004	0.00026	0.26
08/10/2020	136	287.10	1228.50	941.40	577.27	1.63	96%	12.00	25/10/2020	26/10/2020	6	7.00	8	0.16	0.004	0.00007	0.07
10/10/2020	137	202.50	1173.90	971.40	577.27	1.68	99%	14.00	26/10/2020	27/10/2020	6	31.0	8	0.16	0.004	0.00032	0.32
10/10/2020	138	201.90	1165.50	963.60	577.27	1.67	98%	14.00	26/10/2020	27/10/2020	6	27.0	8	0.16	0.004	0.00028	0.28
10/10/2020	139	209.00	1182.40	973.40	577.27	1.69	99%	14.00	26/10/2020	27/10/2020	6	13.0	8	0.16	0.004	0.00014	0.14
10/10/2020	140	220.40	1195.40	975.00	577.27	1.69	99%	14.00	26/10/2020	27/10/2020	6	0.0	8	0.16	0.004	0.00000	0.00
12/10/2020	141	207.10	1184.40	977.30	577.27	1.69	100%	16.00	26/10/2020	27/10/2020	6	19.0	8	0.16	0.004	0.00020	0.20
12/10/2020	142	231.20	1151.60	920.40	577.27	1.59	94%	16.00	26/10/2020	27/10/2020	6	21.0	8	0.16	0.004	0.00022	0.22
12/10/2020	143	225.30	1178.60	953.30	577.27	1.65	97%	16.00	26/10/2020	27/10/2020	6	15.0	8	0.16	0.004	0.00016	0.16
12/10/2020	144	228.80	1200.90	972.10	577.27	1.68	99%	16.00	26/10/2020	27/10/2020	6	18.00	8	0.16	0.004	0.00019	0.19

B. Tratamiento suelo-cemento-arena segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k (m día ⁻¹)	Segunda prueba k(mm día ⁻¹)	Cantidad (%)	Promedio 1° Prueba	Promedio 2° Prueba
25/11/2020	27/11/2020	6	1.0	8	0.16	0.004	0.00001	0.01	10%	0.07	0.05
25/11/2020	27/11/2020	6	10.0	8	0.16	0.004	0.00010	0.10	12%	0.14	0.08
25/11/2020	27/11/2020	6	1.5	8	0.16	0.004	0.00002	0.02	14%	0.18	0.06
25/11/2020	27/11/2020	6	8.0	8	0.16	0.004	0.00008	0.08	16%	0.19	0.08
25/11/2020	27/11/2020	6	6.0	8	0.16	0.004	0.00006	0.06			
25/11/2020	27/11/2020	6	11.0	8	0.16	0.004	0.00011	0.11			
25/11/2020	27/11/2020	6	13.0	8	0.16	0.004	0.00014	0.14			
25/11/2020	27/11/2020	6	1.2	8	0.16	0.004	0.00001	0.01			
26/10/2020	27/10/2020	6	10.0	8	0.16	0.004	0.00010	0.10			
26/10/2020	27/10/2020	6	8.0	8	0.16	0.004	0.00008	0.08			
26/10/2020	27/10/2020	6	5.0	8	0.16	0.004	0.00005	0.05			
26/10/2020	27/10/2020	6	0.0	8	0.16	0.004	0.00000	0.00			
26/10/2020	27/10/2020	6	9.0	8	0.16	0.004	0.00009	0.09			
26/10/2020	27/10/2020	6	7.0	8	0.16	0.004	0.00007	0.07			
26/10/2020	27/10/2020	6	11.0	8	0.16	0.004	0.00011	0.11			
26/10/2020	27/10/2020	6	5.00	8	0.16	0.004	0.00005	0.05			

10. A) Tratamiento suelo-cal primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado (g)	Peso tierra compactada (g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Dosis cal(%)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k (m día ⁻¹)	Primer prueba k (mm día ⁻¹)
26/04/2020	145	188.00	1147.30	959.30	577.27	1.66	98%	6	05/07/2020	05/07/2020	0.004	9.00	8	0.16	0.004	0.1347	134.70
26/04/2020	146	188.20	1151.70	963.50	577.27	1.67	98%	6	05/07/2020	05/07/2020	0.004	18.00	8	0.16	0.004	0.2694	269.41
26/04/2020	147	190.00	1139.50	949.50	577.27	1.64	97%	6	05/07/2020	05/07/2020	0.004	17.00	8	0.16	0.004	0.2544	254.44
26/04/2020	148	173.50	1136.50	963.00	577.27	1.67	98%	6	05/07/2020	05/07/2020	0.004	22.00	8	0.16	0.004	0.3293	329.27
27/04/2020	149	184.80	1132.10	947.30	577.27	1.64	97%	10	05/07/2020	05/07/2020	0.004	12.00	8	0.16	0.004	0.1796	179.60
27/04/2020	150	185.50	1147.80	962.30	577.27	1.67	98%	10	05/07/2020	05/07/2020	0.004	14.00	8	0.16	0.004	0.2095	209.54
27/04/2020	151	233.20	1203.50	970.30	577.27	1.68	99%	10	05/07/2020	05/07/2020	0.004	18.00	8	0.16	0.004	0.2694	269.41
27/04/2020	152	235.90	1178.00	942.10	577.27	1.63	96%	10	05/07/2020	05/07/2020	0.004	22.00	8	0.16	0.004	0.3293	329.27
28/04/2020	153	172.90	1129.10	956.20	577.27	1.66	97%	14	05/07/2020	05/07/2020	0.004	8.00	8	0.16	0.004	0.1197	119.74
28/04/2020	154	181.80	1119.30	937.50	577.27	1.62	96%	14	05/07/2020	05/07/2020	0.004	12.00	8	0.16	0.004	0.1796	179.60
28/04/2020	155	191.80	1116.80	925.00	577.27	1.60	94%	14	05/07/2020	05/07/2020	0.004	25.00	8	0.16	0.004	0.3742	374.18
28/04/2020	156	183.80	1109.00	925.20	577.27	1.60	94%	14	05/07/2020	05/07/2020	0.004	25.00	8	0.16	0.004	0.3742	374.18
28/04/2020	157	191.20	1130.80	939.60	577.27	1.63	96%	18	05/07/2020	05/07/2020	0.004	8.00	8	0.16	0.004	0.1197	119.74
28/04/2020	158	186.70	1123.70	937.00	577.27	1.62	95%	18	05/07/2020	05/07/2020	0.004	22.00	8	0.16	0.004	0.3293	329.27
28/04/2020	159	173.70	1127.00	953.30	577.27	1.65	97%	18	05/07/2020	05/07/2020	0.004	23.00	8	0.16	0.004	0.3442	344.24
28/04/2020	160	243.10	1172.70	929.60	577.27	1.61	95%	18	05/07/2020	05/07/2020	0.004	22.00	8	0.16	0.004	0.3293	329.27

B) Tratamiento suelo-cal segunda prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen (ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	1° Prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k k(mm día ⁻¹)	Cantidad (g)	Promedio 1° Prueba k(mm día ⁻¹)	Promedio 2° Prueba k(mm día ⁻¹)
28/10/2020	28/10/2020	0.3	81.00	8	0.16	0.004	0.02021	134.70	20.21	6	246.96	20.08
28/10/2020	28/10/2020	0.3	110.00	8	0.16	0.004	0.02744	269.41	27.44	10	246.96	12.91
28/10/2020	28/10/2020	0.3	39.00	8	0.16	0.004	0.00973	254.44	9.73	14	261.92	12.22
28/10/2020	28/10/2020	0.3	92.00	8	0.16	0.004	0.02295	329.27	22.95	18	280.63	8.61
28/10/2020	28/10/2020	0.3	29.00	8	0.16	0.004	0.00723	179.60	7.23			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	25.00	8	0.16	0.004	0.00624	209.54	6.24			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	85.00	8	0.16	0.004	0.02120	269.41	21.20			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	68.00	8	0.16	0.004	0.01696	329.27	16.96			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	130.00	8	0.16	0.004	0.03243	119.74	32.43			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	8.00	8	0.16	0.004	0.00200	179.60	2.00			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	19.00	8	0.16	0.004	0.00474	374.18	4.74			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	39.00	8	0.16	0.004	0.00973	374.18	9.73			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	83.00	8	0.16	0.004	0.02070	119.74	20.70			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	23.00	8	0.16	0.004	0.00574	329.27	5.74			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	9.00	8	0.16	0.004	0.00225	344.24	2.25			
28/10/2020	28/10/2020	0.3	23.00	8	0.16	0.004	0.00574	329.27	5.74			

11. Tratamiento compactación Próctor estándar

A) Primera prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada (g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen (mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	Primer prueba k(mm día ⁻¹)
15/07/2020	161	214.70	1115.10	900.40	577.27	1.56	92%	10/08/2020	11/08/2020	3	11.80	8	0.16	0.004	0.00025	0.2453
16/07/2020	162	264.60	1182.10	917.50	577.27	1.59	93%	10/08/2020	11/08/2020	3	69.00	8	0.16	0.004	0.00143	1.4343
17/07/2020	163	214.80	1126.90	912.10	577.27	1.58	93%	10/08/2020	11/08/2020	3	15.00	8	0.16	0.004	0.00031	0.3118
18/07/2020	164	214.10	1098.30	884.20	577.27	1.53	90%	10/08/2020	11/08/2020	3	13.00	8	0.16	0.004	0.00027	0.2702

B) Segunda prueba

Fecha de realización	Núm. Tratam.	Peso cilindro (g)	Peso cilindro + tierra compactado(g)	Peso tierra compactada (g)	Volumen cilindro (cm ³)	Densidad (g cm ⁻³)	Próctor (%)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(mL)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	2° prueba k(mm día ⁻¹)
15/07/2020	161	214.70	1115.10	900.40	577.27	1.56	91.8%	14/10/2020	14/10/2020	3	9.50	8	0.16	0.004	0.00020	0.20
16/07/2020	162	264.60	1182.10	917.50	577.27	1.59	93.5%	14/10/2020	14/10/2020	3	110.00	8	0.16	0.004	0.00229	2.29
17/07/2020	163	214.80	1126.90	912.10	577.27	1.58	92.9%	14/10/2020	14/10/2020	3	6.50	8	0.16	0.004	0.00014	0.14
18/07/2020	164	214.10	1098.30	884.20	577.27	1.53	90.1%	14/10/2020	14/10/2020	3	9.00	8	0.16	0.004	0.00019	0.19

C) Tercera prueba

Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	Primer prueba k(mm día ⁻¹)	2° prueba k(mm día ⁻¹)	3° prueba k(mm día ⁻¹)
18/11/2020	18/11/2020	3	35.00	8	0.16	0.004	0.00073	0.25	0.20	0.73
18/11/2020	18/11/2020	3	145.00	8	0.16	0.004	0.00301	1.43	2.29	3.01
18/11/2020	18/11/2020	3	15.00	8	0.16	0.004	0.00031	0.31	0.14	0.31
18/11/2020	18/11/2020	3	14.00	8	0.16	0.004	0.00029	0.27	0.19	0.29

12. Muestra inalterada (testigo)

Fecha toma de muestra	Núm. Tratam.	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Tiempo (h)	Volumen(ml)	Carga constante h(m)	Longitud de la columna L (m)	Área de la sección (m ²)	k(m día ⁻¹)	k(mm día ⁻¹)
26/09/2020	165	18/11/2020	19/11/2020	1	264.0	8	0.16	0.004	0.02	16.46
26/09/2020	166	18/11/2020	19/11/2020	1	100.0	8	0.16	0.002	0.01	10.10
26/09/2020	167	18/11/2020	19/11/2020	1	120.0	8	0.16	0.002	0.01	12.12
26/09/2020	168	18/11/2020	19/11/2020	1	230.0	8	0.16	0.004	0.01	14.34

Anexo 5. Análisis de precios unitarios de los tratamientos efectivos estadísticamente.

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis:1 Unidad: m²				
	Suministro e instalación de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1.00 mm				
MATERIALES					
	Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de	m ²	\$140.00	1.00	\$140.00
	Agua	m ³	\$70.90	0.20	\$14.46
Subtotal: Materiales					\$140.00
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$470.74 /	45.00	\$10.46
Subtotal: Mano de obra					\$10.46
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m ² /hr	h	\$ 125.35 /	710.00	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$ 375.17	710.00	\$0.53
	Equipo de termofusión para geomembrana de polietileno de alta densidad	h	\$332.50	0.1196	\$39.77
		%	\$10.46	0.3000	\$3.14
Subtotal: Equipo y herramienta					\$43.62
Costo directo:					\$194.08

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 2-D Unidad: m²				
	Tratamiento Gleyzación: 10 kg m ⁻² (40g) paja y 4 cm estiércol				
MATERIALES					
	Paja	kg	\$1.00	10.00	\$10.00
	Estiércol	kg	\$1.00	0.04	\$0.04
	Agua	m ³	\$45.00	0.204	\$9.18
Subtotal: Materiales					\$19.22
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m ² /hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17	710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$28.07

*Los precios de mano de obra, equipo y herramienta se obtuvieron del Catálogo de Costos Horarios de maquinaria. (CMIC, 2009).

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 2-A Unidad: m² Tratamiento con suelo-carbonato de sodio(4 g por kg de suelo)				
MATERIALES					
	Carbonato de sodio	kg	\$11.20	1.020	\$11.42
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
Subtotal: Materiales					\$12.80
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17	710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$21.65

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 3-A Unidad: m² Tratamiento con suelo-tripolifosfato de sodio(6 g por kg de suelo)				
MATERIALES					
	Tripolifosfato de sodio	kg	\$23.51	1.529	\$35.96
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
Subtotal: Materiales					\$37.34
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17	710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$46.19

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 3-A Unidad: m² Tratamiento con suelo-tripolifosfato de sodio(10 g por kg de suelo)				
MATERIALES					
	Tripolifosfato de sodio	kg	\$23.51	2.549	\$59.93
	Agua	m ³	\$11.20	0.031	\$0.34
Subtotal: Materiales					\$60.27
MANO DE OBRA					
		JOR	/	45.00	
Subtotal: Mano de obra					
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35	/ 710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17	710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$60.98

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 6-A Unidad: m² Tratamiento con suelo-cloruro de sodio(8 g por kg de suelo)				
MATERIALES					
	Cloruro de sodio	kg	\$2.24	2.052	\$4.59
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
Subtotal: Materiales					\$5.97
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35	/ 45.00	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35	/ 710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17	/ 710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$14.82

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 6-C Unidad: m²				
	Tratamiento con suelo-cloruro de sodio(16 g por kg de suelo)				
	MATERIALES				
	Cloruro de sodio	kg	\$2.24	4.078	\$9.13
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
				Subtotal: Materiales	\$10.51
	MANO DE OBRA				
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
				Subtotal: Mano de obra	\$8.14
	EQUIPO Y HERRAMIENTA				
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
				Subtotal: Equipo y herramienta	\$0.71
				Costo directo:	\$19.36

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 6-D Unidad: m²				
	Tratamiento con suelo-cloruro de sodio(20 g por kg de suelo)				
	MATERIALES				
	Cloruro de sodio	kg	\$2.24	5.091	\$11.40
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
				Subtotal: Materiales	\$12.78
	MANO DE OBRA				
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
				Subtotal: Mano de obra	\$8.14
	EQUIPO Y HERRAMIENTA				
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
				Subtotal: Equipo y herramienta	\$0.71
				Costo directo:	\$21.63

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 7-A Unidad: m² Tratamiento con suelo-hidróxido de sodio(4 g por kg de suelo)				
	MATERIALES				
	Hidróxido de sodio	kg	\$11.20	1.013	\$11.34
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
				Subtotal: Materiales	\$12.72
	MANO DE OBRA				
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
				Subtotal: Mano de obra	\$8.14
	EQUIPO Y HERRAMIENTA				
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
				Subtotal: Equipo y herramienta	\$0.71
				Costo directo:	\$21.57

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 7-B Unidad: m² Tratamiento con suelo-hidróxido de sodio(8 g por kg de suelo)				
	MATERIALES				
	Hidróxido de sodio	kg	\$11.20	2.052	\$22.97
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
				Subtotal: Materiales	\$24.35
	MANO DE OBRA				
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
				Subtotal: Mano de obra	\$8.14
	EQUIPO Y HERRAMIENTA				
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
				Subtotal: Equipo y herramienta	\$0.71
				Costo directo:	\$33.20

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	m²				
	Análisis: 7-A Unidad:				
	Tratamiento con suelo-bentonita sódica (15 g por kg de suelo=4 kg/m2)				
MATERIALES					
	Bentonita sódica	kg	\$10.08	4.00	\$40.31
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
Subtotal: Materiales					\$41.69
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$50.54

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 7-D Unidad: m²				
	Tratamiento con suelo-bentonita sódica(60 g por kg de suelo=16 kg/m2)				
MATERIALES					
	Bentonita sódica	kg	\$10.08	16.00	\$161.22
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
Subtotal: Materiales					\$162.60
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$171.45

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 9-A Unidad: m² Tratamiento con suelo-cemento(12%)-arena(10%).				
	MATERIALES				
	Cemento Portland	kg	\$3.70	31.18	\$115.29
	Arena	m ³	\$330.00	0.0035	\$1.14
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
				Subtotal: Materiales	\$117.81
	MANO DE OBRA				
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
				Subtotal: Mano de obra	\$8.14
	EQUIPO Y HERRAMIENTA				
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
				Subtotal: Equipo y herramienta	\$0.71
	Nota: El suelo ya contiene 8% de arena. La arena tiene una densidad de 1500 kg/m3 Cada tratamiento utilizó 117.76 ml de agua.La humeda óptima fue de 12%.				
				Costo directo:	\$126.66

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 9-B Unidad: m² Tratamiento con suelo-cemento(12%)-arena(12%)				
	MATERIALES				
	Cemento Portland	kg	\$3.70	31.18	\$115.29
	Arena	m ³	\$330.00	0.007	\$2.29
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
				Subtotal: Materiales	\$118.96
	MANO DE OBRA				
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
				Subtotal: Mano de obra	\$8.14
	EQUIPO Y HERRAMIENTA				
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
				Subtotal: Equipo y herramienta	\$0.71
				Costo directo:	\$127.81

Código	Concepto	Unidad	Costo	Cantidad	Importe
	Análisis: 9-C Unidad: m² Tratamiento con suelo-cemento(12%)-arena(14%)				
MATERIALES					
	Cemento Portland	kg	\$3.70	31.18	\$115.29
	Arena	m ³	\$330.00	0.010	\$3.43
	Agua	m ³	\$45.00	0.031	\$1.38
Subtotal: Materiales					\$120.10
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$366.35 /	45.00	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo:					\$128.95

Código	Concepto	Unidad	Costo	cantidad	Importe
	Análisis: 11 Unidad: M2 Compactación al 85% próctor estándar. incluye: suministro de agua, equipo, herramienta y mano de obra				
MATERIALES					
	AGUA	M3	\$45.00	0.0306	\$1.38
Subtotal: Materiales					\$1.38
MANO DE OBRA					
	Ayudante oficial	JOR	\$ 366.35 /	45	\$8.14
Subtotal: Mano de obra					\$8.14
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
	Placa vibratoria manual Elba de 8 hp motor de gasolina. produce hasta 710 m2/hr	h	\$125.35 /	710.0000	\$0.18
	Rodillo Vibratorio Doble Cipsa Mod. AR25PP, Motor Perkins 403D-15 33.6 H.P., ancho de rodillo 106 cm	h	\$375.17 /	710.0000	\$0.53
Subtotal: Equipo y herramienta					\$0.71
Costo directo					\$10.23

Anexo 6. Cotización realizada en la página de Mercado libre.

Productos	Precio	Fecha de consulta	Precio/Kg	URL
Cal hidratada 25 kg	\$ 55.00	16/09/2020	\$2.20	https://www.homedepot.com.mx/materiales-de-construccion/basicos-de-construccion/polvos-en-bolsa/cal-hidratada-25kg-568409
Arena Carro de 6 m ³	\$ 1,980.00	09/10/2020	\$330.00	https://www.homedepot.com.mx/materiales-de-construccion/basicos-de-construccion/arenas-y-grava/carga-completa-de-arena-6m3-202860
Cemento Holcim Apasco (t)	\$ 3,697.50	16/09/2020	\$3.70	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-775352246-cemento-holcim-apasco-por-tonelada- JM#position=1&type=item&tracking_id=7561474d-3553-4f56-8449-1d01a40b518c
Carbonato de sodio bulto de 25 kg	\$ 705.00	16/09/2020	\$28.20	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-722789827-carbonato-de-sodio-bulto-de-25-kg- JM#position=6&type=item&tracking_id=8d0063c7-9a7f-45e1-8c5b-613d2b388dea
Tripolifosfato de sodio marca Innophos (kg)	\$ 50.00	16/09/2020	\$50.00	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-779518422-tripolifosfato-de-sodio-grado-industrial-marca-innophos- JM#position=13&type=item&tracking_id=f8979295-06ca-4cec-b814-54295c1bd1d7
Fosfato de sodio	No existe en venta			
Silicato de sodio 20L con envío	\$ 850.00	16/09/2020	\$42.50	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-664656241-silicato-20-litros-con-envio- JM#position=7&type=item&tracking_id=7414857d-ae1e-4ddc-94d3-c4ca691f1f2a
Bentonita sódica saco de 50 kg	\$ 650.00	16/09/2020	\$13.00	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-610495989-bentonita-sodica-saco-50-kg-tonelada-costal-promo-ton- JM#position=15&type=item&tracking_id=2799f02a-1042-4fb1-b81f-fc404cde8d2d
Hidróxido de sodio escamas saco 25 kg	\$ 1,380.00	16/09/2020	\$55.20	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-809707228-sosa-caustica-en-escamas-al-100-25-kg-hidroxido-de-sodio- JM#position=8&type=pad&tracking_id=148d96ee-1994-43ff-bd49-6a4036706500&is_advertising=true&ad_domain=VOCATCORE_LST&ad_position=20&ad_click_id=NmUwNGI5ZGUtYzRkYy00OGJkLThtZGQtNjFIOGU3ZjY0MDAz
Cloruro de sodio(sal común) kg	\$ 10.50	16/09/2020	\$10.50	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-765397692-1-kg-sal-comun-fina-de-mesa-cloruro-de-sodio-a-granel- JM#position=18&type=item&tracking_id=b6038500-6eec-4a52-92e3-4200253b2511

Anexo 7. Cotización realizada en la página de Alibaba.

Productos	Precio	Fecha de consulta	Precio/Kg	URL
Carbonato de sodio por kg (pedido >=40 kg)	\$ 11.20	16/09/2020	\$11.20	https://spanish.alibaba.com/product-detail/cas497-19-8-industry-grade-cna2o3-sodium-carbonate-price-per-ton-soda-ash-sodium-62106389393.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.6a454703VIT1Xf
Tripolifosfato de sodio (t)	\$ 23,511.71	16/09/2020	\$23.51	https://spanish.alibaba.com/product-detail/Sodium-Tripolyphosphate-STPP-Price-60777944562.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.597244c9CHEMVD&s=p
Fosfato de sodio por kg (25 kg pedido mínimo)	\$ 66.96	16/09/2020	\$66.96	https://spanish.alibaba.com/product-detail/sodium-phosphate-dibasic-dodecahydrate-62576537434.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.6ee65bdaHXb8Di&s=p
Silicato de sodio (t)	\$ 22,392.10	16/09/2020	\$22.39	https://spanish.alibaba.com/product-detail/sodium-silicate-price-60423022503.html?spm=a2700.md_es_ES.deiletai6.10.47e720b4KtUDaL
Bentonita sódica (t)	\$ 10,076.45	16/09/2020	\$10.08	https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-purity-sodium-bentonite-62221891766.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.7ca01506ntli9l
Hidróxido de sodio escamas (t)	\$ 11,196.05	16/09/2020	\$11.20	https://spanish.alibaba.com/product-detail/manufacturers-caustic-soda-flake-99-sodium-hydroxide-cas-1310-73-2-62420266159.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.180945f2fRHluj
Cloruro de sodio (t)	\$ 2,239.21	16/09/2020	\$2.24	https://spanish.alibaba.com/product-detail/refined-salt-50kg-bag-25kg-bag-60200531773.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.37fd710dxK7cVX