

Control de infiltración en regolito volcánico con diferentes técnicas de sellado

Infiltration control in a volcanic regolith with different sealing techniques

Magdalena Francisco-Catarina¹ , Demetrio Salvador Fernández-Reynoso^{1‡} ,
Rogelio Carrillo-González¹ , Daniel Hernández-Díaz¹ ,
José Donaldo Ríos-Berber¹  y Patricio Sánchez-Guzmán¹ 

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[‡] Autor para correspondencia (demetrio@colpos.mx)

RESUMEN

En la parte alta del municipio de Huasca de Ocampo, Hidalgo, el suelo (regolito) es producto de la intemperización de materiales volcánicos con altas tasas de infiltración de agua (13.25 mm día⁻¹) con 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 proyecto de bordo de almacenamiento localizado en un suelo residual volcánico. Se evaluaron variables físicas, químicas y mecánicas del suelo. Se aplicaron 46 tratamientos con sus respectivas repeticiones, para sellar el suelo. Se midió en permeámetro de carga constante el coeficiente de permeabilidad del suelo en dos etapas 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 se hizo con el método de la diferencia mínima significativa (LSD), para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Con resultados de permeabilidad se elaboró un análisis económico, comparando los precios unitarios de los tratamientos contra el precio de la geomembrana. En términos económicos y en control de la infiltración los tratamientos con dispersantes de partículas (carbonato de sodio, tripolifosfato de sodio y fosfato de sodio) son recomendables, aunque hay que considerar aplicaciones de mantenimiento cada dos o tres años. El tratamiento más económico fue la compactación próctor estándar, sin embargo, esta alternativa no es

recomendable por presentar el suelo incrementos de permeabilidad con el tiempo. El uso del cemento-arena y la bentonita sódica resultaron muy eficaces, aunque sus costos son elevados, tienen la ventaja de ser una alternativa duradera.

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

SUMMARY

In the upper part of the municipality of Huasca de Ocampo, Hidalgo, the soil (regolith) derives from weathering of volcanic materials and is characterized by high rates of water infiltration (13.25 mm day⁻¹), which causes critical difficulties to store water. Our study aimed at evaluating –in terms their permeability and economic cost– different sealing techniques to reduce infiltration in a reservoir area excavated over residual volcanic soil. The physical, chemical, and mechanical features of the soil were measured. Different treatments (46) to seal the soil were tested. The soil permeability coefficient was measured in two stages in a constant load permeameter to compare the effect through 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 at a significance level of $\alpha = 0.05$. An economic analysis was conducted using the permeability results, comparing the unitary cost of treatments against

Cita recomendada:

Francisco-Catarina, M., Fernández-Reynoso, D. S., Carrillo-González, R., Hernández-Díaz, D., Ríos-Berber, J. D. y Sánchez-Guzmán, P. (2021). Control de infiltración en regolito volcánico con diferentes técnicas de sellado. *Terra Latinoamericana*, 39: 1-15. e939. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.939>

Recibido: 25 de marzo de 2021. Aceptado: 28 de junio de 2021.
Artículo. Volumen 39, julio de 2021.

the geomembrane cost. According to our results, in terms of economic costs and infiltration control, treatments with particle dispersants (sodium carbonate, sodium tripolyphosphate and sodium phosphate) are recommended, although maintenance applications must be considered every two or three years. The use of sand-cement and sodium bentonite were highly effective, and while these are costly materials, they constitute a long-lasting alternative.

Index words: *coefficient of permeability, proctor compaction, particle dispersants, gleyization, volcanic soils.*

INTRODUCCIÓN

La infiltración en cuerpos de agua es un problema que se presenta en distintos lugares del mundo. Los pequeños embalses constituyen el medio de suministro 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, Hidalgo, el suelo predominante donde se excavan almacenamientos, principalmente para abrevadero, corresponde a regolitos producto de la intemperización de materiales volcánicos los cuales, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) (ASTM, 1985), se designan como CL (arcilla inorgánica de baja plasticidad) y presentan tasas de infiltración de agua, entre 1.49 y 17.02 mm día⁻¹ (Lenz, 2016). Este tipo de obras, requieren 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 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, Tuyub y Cetina (2017) afirman que el precio de la geomembrana, comparada con la mezcla del suelo cemento, es elevado ya que se requiere de un tratamiento especializado y personal capacitado para su instalación.

Como alternativas a la geomembrana o el concreto se tienen los métodos de sellado como la compactación, la gleyización, los dispersantes de partículas,

el cemento-arena, la cal-arcilla y la bentonita sódica. La ventaja de estos métodos alternativos es una mayor vida útil y no requieren de personal calificado para su instalación. Autores como Nicholaichuk (1978), McConkey, Reimer, Nicholaichuk y Jame (1990) y Ahmad, Aslam y Shafiq (1996) obtuvieron resultados aceptables en la aplicación de la técnica de sellado biológico (gleyización), con permeabilidades de 12, 48.7 y 30 mm día⁻¹, respectivamente. En lo que respecta a los dispersantes de partículas Pepper (1983) y Ono y Kubitz (2003) sugieren aplicarlos de forma homogénea. Barreto, Carvallo y Gheyi (2003) utilizó carbonato de sodio y redujo la infiltración de 866 a 26.4 mm día⁻¹.

En el caso de la bentonita sódica, Pfost, Williams y Koenig (1997) recomiendan dosis de 4.88 kg m⁻² para un suelo con presencia de arcilla y 14.65 kg m⁻² para materiales con arena y grava. El uso de cemento ha sido estudiado por varios autores. Payán *et al.* (2017) utilizó 10% de cemento en peso del suelo, encontrando permeabilidades entre 0.017 y 0.026 mm día⁻¹ en arena arcillosa (SC) y arcilla de baja plasticidad (CL), respectivamente. Por su parte Toirac (2008) considera suelos aptos para mezclas de suelo-cemento aquellos cuyos consumos de cemento en peso se encuentren entre 5% y 12%, con respecto al peso del suelo.

En la última década, Nerinx *et al.* (2016) ha utilizado la cal en diques y presas de vertederos para la protección de superficies y mejora de la resistencia mecánica en terraplenes. Herrier *et al.* (2013) y Mendoza *et al.* (2018) han utilizado dosis de 4% de cal viva y 11% de cal hidratada respectivamente, obteniendo resultados favorables en la estabilización del suelo.

El coeficiente de permeabilidad en obras de ingeniería civil ha sido estudiado por autores como Jaramillo (2002), quien encontró para un relleno sanitario impermeable, en un suelo intemperado, valores entre 0.000864 y 0.864 mm día⁻¹. Por su parte Crespo (2004) observó límites entre 0.000864 y 0.0864 mm día⁻¹ en arcillas homogéneas ubicadas bajo la zona de meteorización. La USDA (2012) considera valores entre 0.00864 y 0.864 mm día⁻¹ en suelos tipo CL con contenido de arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad. En obras de ingeniería civil con núcleo impermeable FAO (2020) recomienda un coeficiente de permeabilidad entre 0.0000086 y 0.432 mm día⁻¹. A partir de los coeficientes de permeabilidad límite reportado para pequeños bordos

de almacenamiento, se adoptó un límite máximo permitido de $0.864 \text{ mm día}^{-1}$.

El objetivo de la investigación fue evaluar técnicas de sellado para el control de la infiltración, a un límite máximo permitido de $0.864 \text{ mm día}^{-1}$, en un suelo residual producto del intemperismo químico de tobas volcánicas en Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El sitio de estudio corresponde a un proyecto de construcción para una obra de almacenamiento en las coordenadas $20^{\circ} 9' 43.18'' \text{ N}$ y $98^{\circ} 29' 42.65'' \text{ O}$ (Figura 1) ubicado en la localidad de Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo. El área forma parte del Eje Neovolcánico Transversal, específicamente de la subprovincia de llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo (INEGI, 2009). El sitio de muestreo se encuentra a 2294 m de altitud; la temperatura promedio es de 17°C ; el suelo predominante es vertisol crómico con una alta proporción de arcillas expandibles y la vegetación corresponde a bosque de encino con

vegetación secundaria arbustiva (Hernández *et al.*, 2019).

El procedimiento seguido en la investigación (Figura 2) consistió en primer lugar determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo residual, entre estas últimas, 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 método de sellado, 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. Las permeabilidades resultantes se analizaron con el software R para identificar los mejores tratamientos a través de la varianza - con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ - y la comparación de medias con la diferencia mínima significativa (LSD). Con base en los resultados obtenidos, se realizó un análisis económico comparando los precios unitarios de los tratamientos ubicados debajo del límite permisible ($K = 0.864 \text{ mm día}^{-1}$) contra el precio de la geomembrana. Finalmente se seleccionó el mejor tratamiento con respecto a su costo unitario y su permeabilidad.

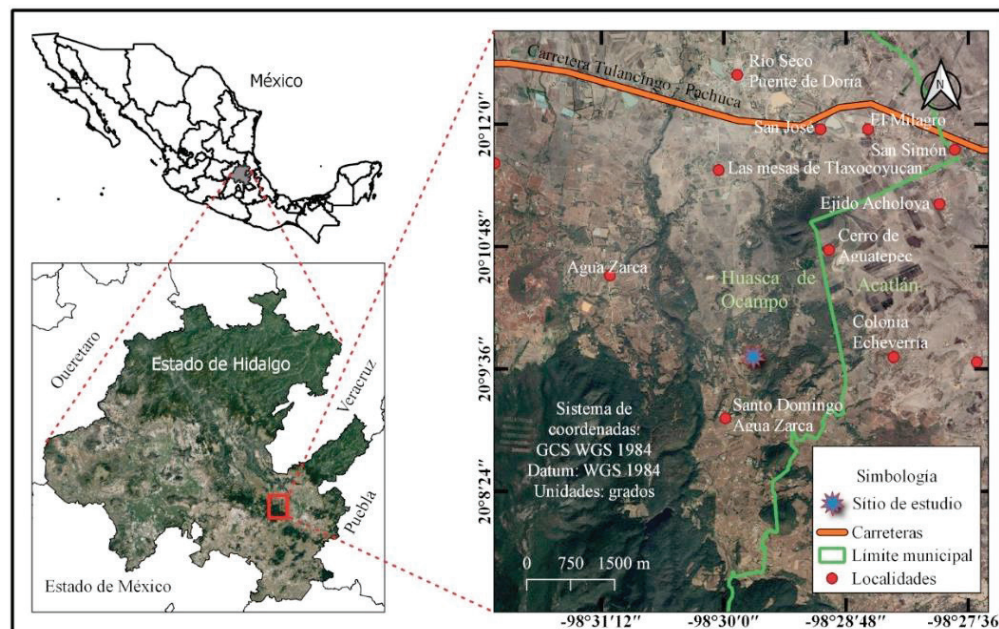


Figura 1. Localización del área de estudio en Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo.

Figure 1. Location of the study area in Santo Domingo, Huasca de Ocampo, Hidalgo.

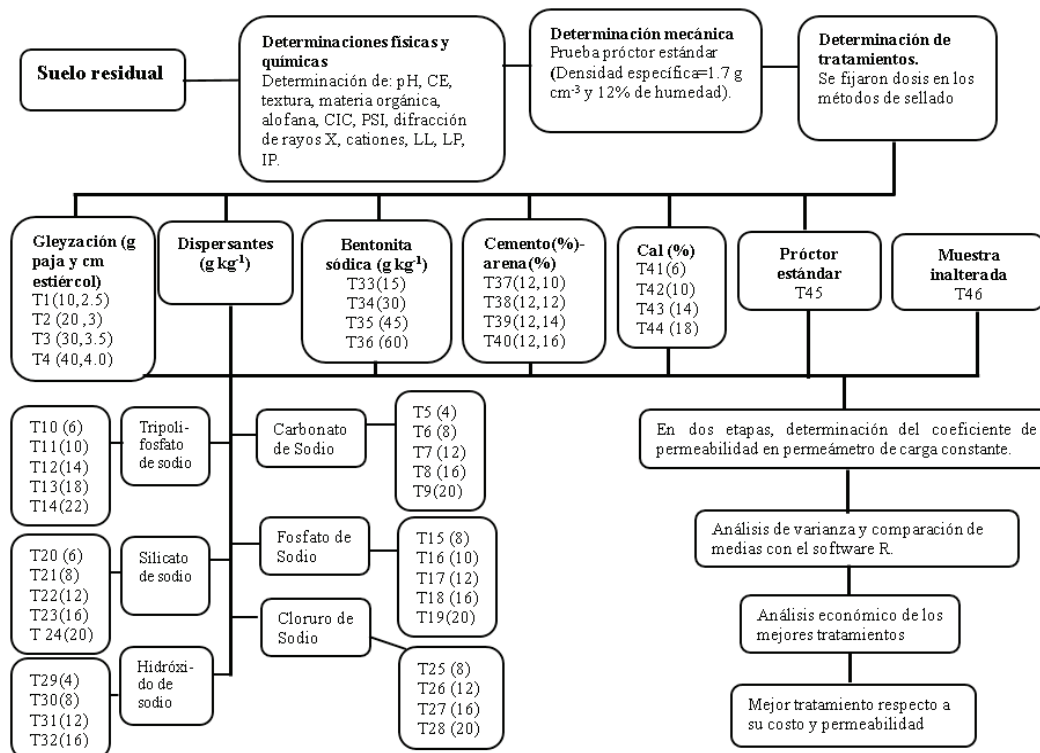


Figura 2. Metodología para identificar los mejores tratamientos en el control de la permeabilidad del agua.
Figure 2. Methodology to identify the best treatments in the control of water permeability.

Determinaciones Físicas, Químicas y Mecánicas del Suelo

Se realizó un muestreo en el sitio de la posible construcción de la obra de almacenamiento. Con el uso de una retroexcavadora, se hicieron calicatas para tomar muestras a una profundidad de uno a dos metros. Las propiedades determinadas fueron: pH con el método descrito en SEMARNAT (2002); textura por el método de Bouyoucos modificado (previa separación de arenas); conductividad eléctrica (CE) con la metodología de SEMARNAT (2002); materia orgánica por el método de Walkley y Black (1934); alófana mediante el procedimiento de Fieldes y Perrot (1966); capacidad de intercambio catiónico (CIC) con el método sugerido por Chapman (1965); porcentaje de sodio intercambiable (PSI) descrito en SEMARNAT (2002); identificación de la fracción arcillosa con el difractor de rayos X con tratamiento previo al suelo sugerido por (Kunze y Dixon, 1986); cationes con el método mostrado en SEMARNAT (2002) y límites de Atterberg (LL y LP) con el uso de la copa

de Casagrande (ASTM, 2017b). La clasificación del suelo se hizo con el criterio SUCS de la norma ASTM (2017a) determinando los límites líquido y plástico en la carta de plasticidad de Casagrande.

Las determinaciones se muestran en el Cuadro 1. La textura del suelo residual corresponde a una arcilla con presencia de caolinita, montmorillonita, halloysita, bernésita, todorokita y gibbsita. El pH es moderadamente ácido (SEMARNAT, 2002). La CIC corresponde a caolinitas según SEMARNAT (2002), el catión dominante fue el calcio. El PSI (10%) es bajo, según Shainberg y Letey (1984) un aumento por arriba de 15% de sodio desintegra las arcillas y reduce 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 (Figura 3). La inexistencia de alófana 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 1. Características físicas y químicas del suelo.
Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil.

Característica	Valor
Arena (%)	8.00
Limo (%)	36.00
Arcilla (%)	56.00
Composición mineralógica de la fracción arcilla	caolinita, montmorillonita, halloysita, bernésita, todorokita y gibbsita.
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 alófana	Negativo
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.46
Clasificación del suelo (SUCS)	CL (arcilla inorgánica de baja plasticidad)

Prueba de Compactación Próctor Estándar

El ensayo se realizó aplicando el Método A de la norma ASTM (2012). El suelo se tamizó en malla #4 (4.76 mm), utilizando un molde de 4 pulgadas (101.6 mm) y se compactó en tres capas, con 25 golpes por capa. El pisón utilizado fue de 5.5 lbf (24.4 N) con caída de 12 pulgadas (305 mm) de altura, produciendo una energía de compactación de 12,400 pie-lbf pies³ (600 kN-m m³). La densidad específica, para una humedad óptima del 12%, resultó de 1.70 g cm⁻³ (Figura 4).

Dosis de Tratamientos y Estabilización del Suelo

Se analizaron 11 métodos y un testigo (Cuadro 2). En total se analizaron 46 tratamientos, con cuatro repeticiones cada uno, 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 (2012). Los tratamientos del 1 al 45 se compactaron conforme a valores de humedad y densidad específica obtenidos de la prueba próctor. Cada repetición se realizó en moldes de PVC de 75 mm de diámetro, con un espesor de suelo de 15 cm.

Para la gleyzación se utilizó la metodología descrita por (Nicholaichuk, 1978). El procedimiento consistió en colocar una capa de arena en el fondo del cilindro, seguido por cinco cm de suelo, después una capa de estiércol fresco de porcino, paja y cinco cm de suelo. Fueron cuatro tratamientos con las dosis mostradas en la Figura 2.

En las dosis de tratamientos con dispersantes de partículas (Figura 2), primero se obtuvo el peso molecular (PM) de cada dispersante en g mol⁻¹ para posteriormente multiplicarlo por la cantidad de sodio

que retiene el suelo en g kg^{-1} , 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 ($12 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$) por el PM del sodio (23 g mol^{-1}). Con estos datos se obtuvieron gramos de dispersantes por cada kilogramo de suelo que se utilizaron como referencia para la dosis final de cada uno de los tratamientos.

La dosis para el método de sellado con bentonita sódica se realizó con base en la recomendación de Pfof *et al.* (1997) con aplicaciones de 4 a 16 kg m^{-2} . Por cuestiones de simplicidad, se fijaron dosis en 15, 30, 45 y 60 g de bentonita sódica por kilogramo de suelo.

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} . De este modo, se decidió ensayar la permeabilidad con cemento al 12% y la arena se varió en 10, 12, 14 y 16% (Figura 2).

En tratamientos con cal, se determinó el porcentaje óptimo de cal según indicaciones proporcionadas por la norma ASTM (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. En este caso, para el suelo del sitio resultó un porcentaje de 12% para un pH de 11.9 (Figura 5). 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.

Medición del Coeficiente de Permeabilidad

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se utilizó un permeámetro con una carga constante de ocho metros. Las muestras de cada ensayo se saturaron dos días (Figura 6). El agua que pasaba por la columna se midió en periodos de tres y seis horas, dependiendo de los tratamientos. En general, se dejó que la muestra se estabilizara durante 12 horas, pero en algunos casos se necesitó más tiempo hasta que el volumen resultara constante.

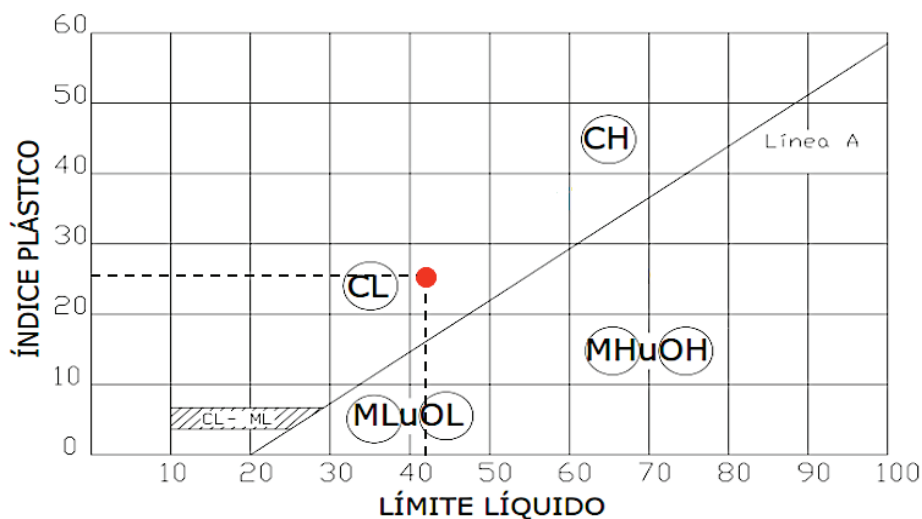


Figura 3. Clasificación del suelo residual en la carta de plasticidad de Casagrande. CL = arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media; CH = arcillas inorgánicas de alta plasticidad; ML = limos inorgánicos de ligera plasticidad; OL = limos orgánicos o arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad; MH = limos inorgánicos; OH = arcillas orgánicas de plasticidad media a alta (ASTM, 2017b).

Figure 3. Classification of residual soil in the Casagrande plasticity charter. CL = inorganic clays with low to medium plasticity; CH = high plasticity inorganic clays; ML = light plasticity inorganic silts; OL = organic silts or low plasticity organic silty clays; MH = inorganic silts; OH = organic clays of medium to high plasticity (ASTM, 2017b).

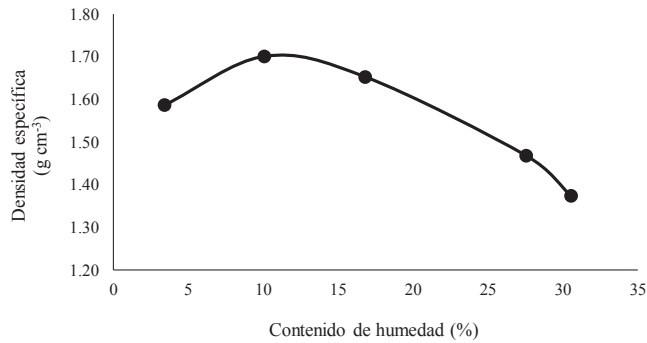


Figura 4. Curva de compactación próctor estándar.
Figure 4. Standard proctor compaction curve.

Análisis Estadístico

Para el análisis de la respuesta de los diferentes métodos de sellado, en el control de la permeabilidad del suelo, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA), mediante el uso del software R (R Core Team, 2020). Para la comparación de medias, se utilizó el método de comparaciones múltiples con la diferencia mínima significativa (LSD) o *t*-Fisher, dicho procedimiento consiste en una prueba de hipótesis por parejas basada en la distribución *t*. El nivel de significancia utilizado fue $\alpha = 0.05$.

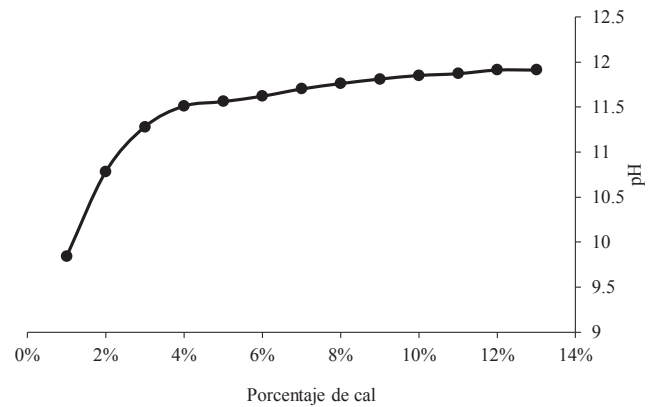


Figura 5. Variación del pH con respecto a las diferentes mezclas de suelo-cal.
Figure 5. Variation of the pH according to the different mixtures of soil-lime.

Análisis Económico

Para cada uno de los tratamientos y la geomembrana se realizó un análisis de precios unitarios por m². Los precios de mano de obra, equipo y herramienta se obtuvieron del catálogo de costos horarios de maquinaria de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (Rodríguez y López, 2019).

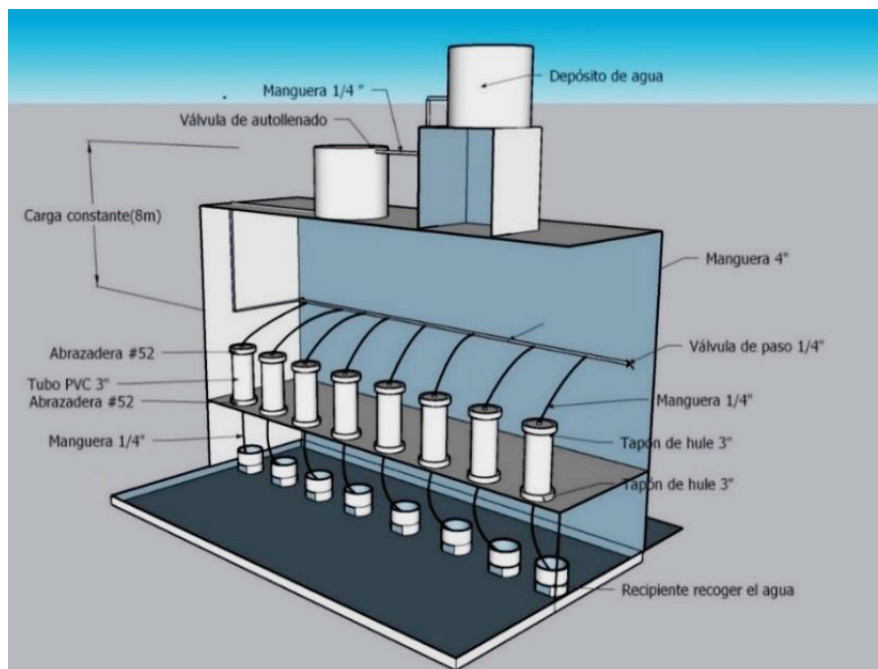


Figura 6. Esquema del permeámetro de carga constante, dimensiones fuera de escala.
Figure 6. Diagram of the constant charge permeameter, dimensions out of scale.

La clasificación de los tratamientos se hizo con base en el costo relativo (%) entre el precio unitario del tratamiento y de la geomembrana.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coefficiente de Permeabilidad de los Tratamientos

Los mayores valores de permeabilidad se encontraron en los tratamientos de gleyzación, seguidos de los tratamientos con cal hidratada, mientras que los valores menores correspondieron a los dispersantes de partículas (Cuadro 2).

En la Figura 7 se observan los coeficientes de permeabilidad resultantes de los tratamientos de gleyzación, bentonita sódica, cemento-arena, cal hidratada y compactación próctor estándar. En tratamientos con gleyzación el coeficiente de permeabilidad promedio resultó superior al límite máximo permitido (0.864 mm día⁻¹) para obras de ingeniería civil (Jaramillo, 2002; Crespo, 2004; USDA, 2012; FAO, 2020). El tratamiento con menor coeficiente de permeabilidad ($K = 7.88$ mm día⁻¹) contenía 40 g de paja y 4 cm de estiércol. Si se compara el valor anterior con el reportado por Nicholaichuk (1978) (12 mm día⁻¹), Teichert-Coddington, Peralta y

Cuadro 2. Coeficiente de permeabilidad por cada tratamiento.
Table 2. Permeability coefficient for each treatment.

Tratamiento	K	Tratamiento	K	Tratamiento	K
	mm día ⁻¹		mm día ⁻¹		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				

K = coeficiente de permeabilidad. Medias (K) ± desviación estándar con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$, Fisher-LSD).

K = coefficient of permeability. Means (K) with different letters in the same column indicates significant differences ($P \leq 0.05$, Fisher-LSD).

Phelps (1989) ($7\text{--}12\text{ mm día}^{-1}$), McConkey *et al.* (1990) (48.72 mm día^{-1}) y Ahmad *et al.* (1996) (30 mm día^{-1}) se encuentra en los límites inferiores, considerando que los autores dejaron el experimento por más tiempo y continuaron sus mediciones en periodos de 2 a 3 meses, 350 días, 1 año, 2 años y 5 años.

En los tratamientos con bentonita sódica (Figura 7) de 45 y 60 g kg^{-1} se tuvieron permeabilidades inferiores

al umbral permitido (0.864 mm día^{-1}), también se observó que a mayor dosis y paso del tiempo el coeficiente era menor. Todas las dosis de cemento-arena tuvieron permeabilidades menores al umbral de referencia (0.864 mm día^{-1}) y el valor más bajo ($K = 0.05\text{ mm día}^{-1}$) correspondió a la combinación 12% de cemento y 10% de arena, con respecto al peso del suelo.

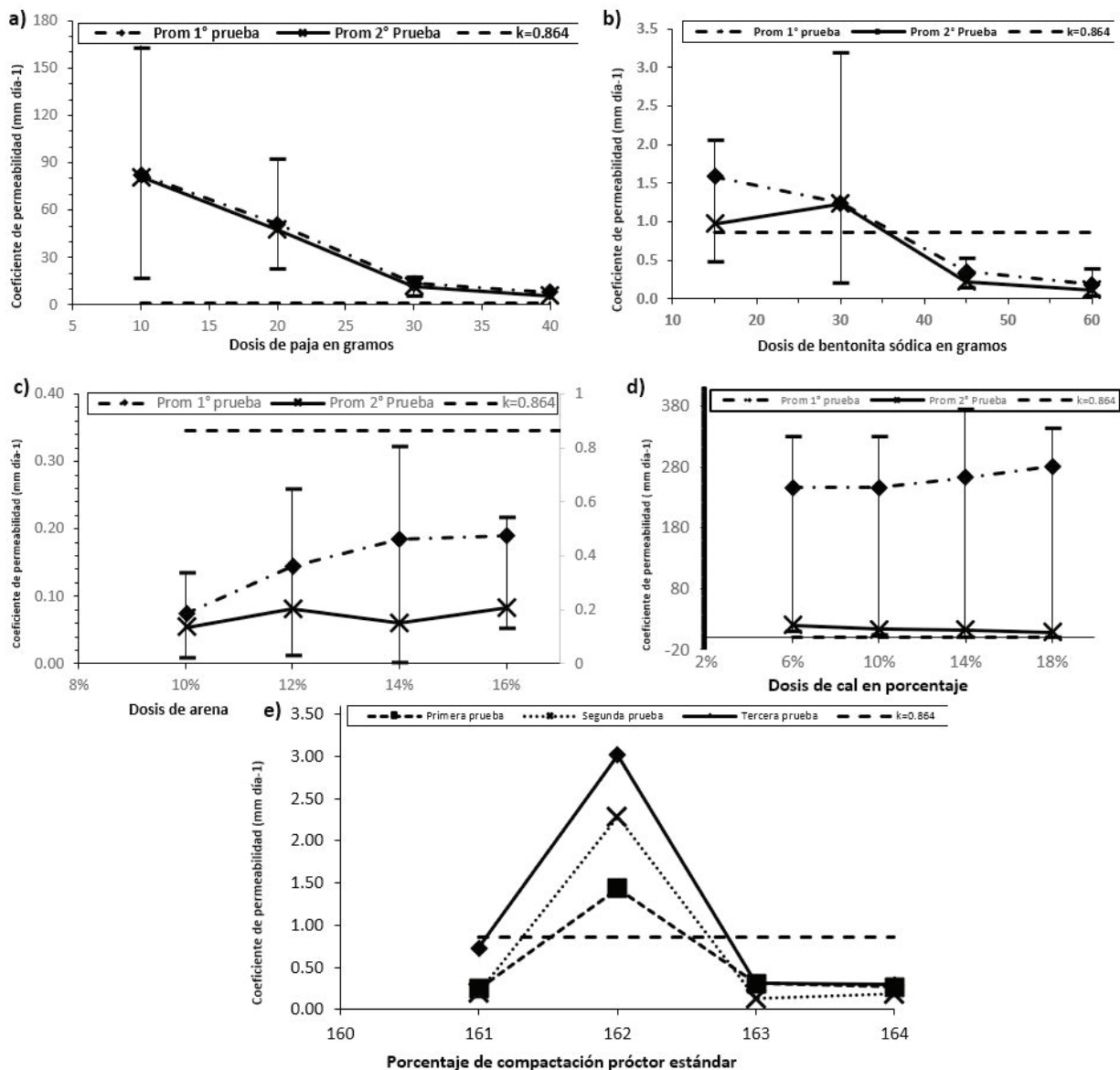


Figura 7. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con: (a) gleyzación, (b) bentonita sódica, (c) cemento - arena, (d) cal hidratada y (e) compactación próctor estándar.

Figure 7. Permeability coefficient in treatments with: (a) gleization, (b) sodium bentonite, (c) cement - sand, (d) hydrated lime and (e) standard proctor compaction.

Para la cal hidratada (Figura 7), en el primer ensayo de permeabilidad resultaron valores elevados entre 246.96 y 280.63 mm día⁻¹; sin embargo, en la segunda prueba la permeabilidad disminuyó entre 8.61 y 20.08 mm día⁻¹; pero no se alcanzó el límite aceptable ($K = 0.864$ mm día⁻¹). Esto probablemente se relacione con la cal hidratada que se adicionó y que promovió la floculación de la arcilla, lo que favoreció una mayor permeabilidad del suelo (Weil y Brady, 2017).

El tratamiento a base de compactación (Figura 7), con al menos 85% de la prueba próctor estándar, mostró permeabilidades menores al umbral de 0.864 mm día⁻¹. En este tratamiento se observó un incremento de la permeabilidad con el paso del tiempo, pasando de 0.53 a 0.70 mm día⁻¹ (64 días después de la primera medición) y 1.09 mm día⁻¹ 99 días después; probablemente asociado a cambios de humedad del suelo por secado y mojado debido principalmente al contenido de arcilla expandible del tipo 2:1 (montmorillonita) (Weil y Brady, 2017).

Por último, en la muestra inalterada (Cuadro 2) se obtuvo una permeabilidad promedio de 13.25 mm día⁻¹ que representa las condiciones naturales del sitio de estudio, valor que corresponde a un suelo permeable según la clasificación (FAO, 2020).

En la Figura 8 se muestra la permeabilidad de tratamientos con dispersantes de partículas. De manera general los valores de los coeficientes de permeabilidad se ubicaron por abajo del límite permisible (0.864 mm día⁻¹) a excepción de la dosis de 16 g de silicato de sodio por kilogramo de suelo. De forma particular, el carbonato de sodio demostró ser muy eficiente en el control de la infiltración y el tratamiento más efectivo fue la dosis 4 g kg⁻¹ de suelo, con valor $K = 0.0$ mm día⁻¹. Lo cual contrasta con los valores encontrados por Nicholaichuk (1978) (2.4 mm día⁻¹), Neff (1980) (4 mm día⁻¹) y Barreto *et al.* (2003) (26.4 mm día⁻¹). El tripolifosfato de sodio tuvo una tendencia similar al carbonato de sodio, el valor promedio más eficaz fue $K = 0$ mm día⁻¹ para dosis de 6 y 10 g kg⁻¹. En el caso del fosfato de sodio el valor promedio efectivo fue 0 mm día⁻¹ para la dosis mínima (6 g kg⁻¹). Al evaluar los tratamientos con silicato de sodio, la dosis que proporcionó el menor coeficiente de permeabilidad ($K = 0.16$ mm día⁻¹) fue de 6 g kg⁻¹. Con respecto al cloruro de sodio, los tratamientos con la menor permeabilidad ($K = 0.03$ mm día⁻¹) correspondieron a las dosis máximas (16 y 20 g kg⁻¹).

Para el hidróxido de sodio dosis de 4 g kg⁻¹ controlaron la permeabilidad a un nivel de 0.02 mm día⁻¹.

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 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 y desarrollan una estructura de suelo firme e impermeable (Weil y Brady, 2017).

Comparación de Tratamientos

Se concluye, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, que no todos los tratamientos producen el mismo efecto (Cuadro 3). El valor $Pr = 2e^{-16}$ indicó que al menos una de las medias fue diferente. En total, se obtuvieron 35 tratamientos sin diferencias significativas entre ellos y 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.

Los tratamientos que no cumplen con el límite permisible (0.864 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). En 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 por más tiempo, por ejemplo, Herrier *et al.* (2013) obtuvo valores satisfactorios hasta los 35 años. En el caso del método de sellado por gleyzación, el tiempo de medición (81 días) fue muy corto, comparado con los cinco años que McConkey *et al.* (1990) registró, alcanzando una permeabilidad de 48.72 mm día⁻¹.

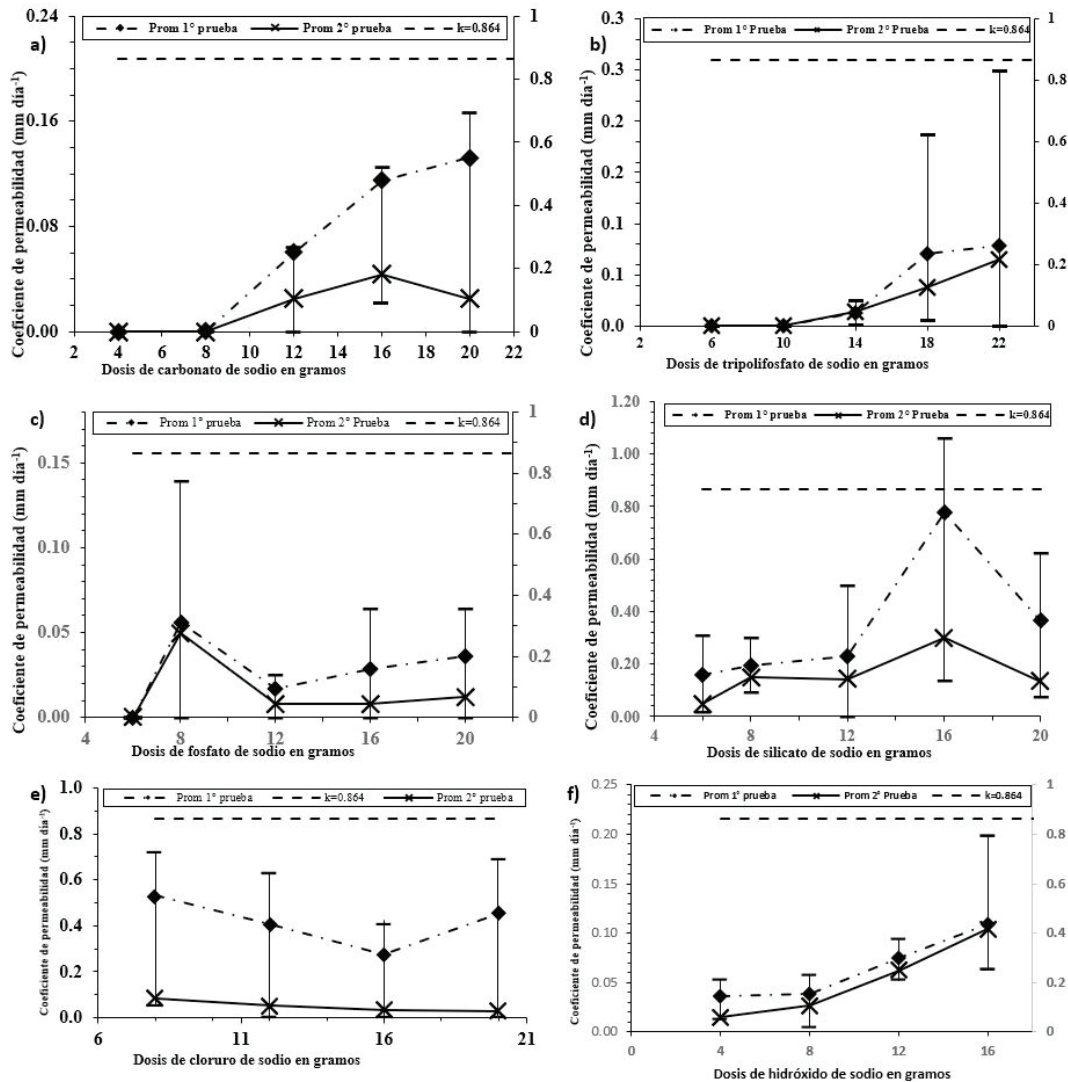


Figura 8. Coeficiente de permeabilidad en tratamientos con dispersante de partículas: (a) carbonato de sodio, (b) tripolifosfato de sodio, (c) fosfato de sodio, (d) silicato de sodio, (e) cloruro de sodio y (f) hidróxido de sodio.

Figure 8. Permeability coefficient in particle dispersant treatments: (a) sodium carbonate, (b) sodium tripolyphosphate, (c) sodium phosphate, (d) sodium silicate, (e) sodium chloride and (f) sodium hydroxide sodium.

Los tratamientos no efectivos de bentonita sódica se debieron a dosis bajas para alcanzar un sellado aceptable.

Análisis Económico

Se encontró que 35 tratamientos presentan infiltraciones por debajo del umbral de 0.864 mm día⁻¹, marcados con la letra d (Cuadro 3). De estos tratamientos, se analizó costo unitario con relación

al precio unitario de la geomembrana, resultando 32 tratamientos con costos inferiores a la geomembrana (Figura 9). Los resultados mostraron que el mejor tratamiento tanto económicamente, como efectivo en el control de la infiltración 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 en el sitio del proyecto.

Cuadro 3. Medidas de tendencia central y dispersión de los tratamientos.
Table 3. Measures of central tendency and dispersion of treatments.

Tto	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Est.	Tto	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	10.1	16.46	2.75	T15	0.05d	0.00	0.16	0.07
T42	12.91cd	6.24	21.2	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	20.7	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	0.5	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

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

Tto = treatments; Desv. Est. = standard deviation; Coefficient of variation = 211.573; LSD (least significant difference) = 14.036 and mean square of the error = 100.78. Different letters in the same column indicate significant differences ($P \leq 0.05$, Fisher-LSD).

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 permeabilidad promedio entre 0 y 0.30 mm día⁻¹, aunque las permeabilidades 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, según Payán *et al.* (2017) su efecto es duradero, y sus costos alcanzan en promedio un 66% respecto a la geomembrana. Por otra parte, los tratamientos con bentonita sódica (T35 y T36) resultaron efectivos y sus costos comparados con la geomembrana son 68% y 88%, respectivamente.

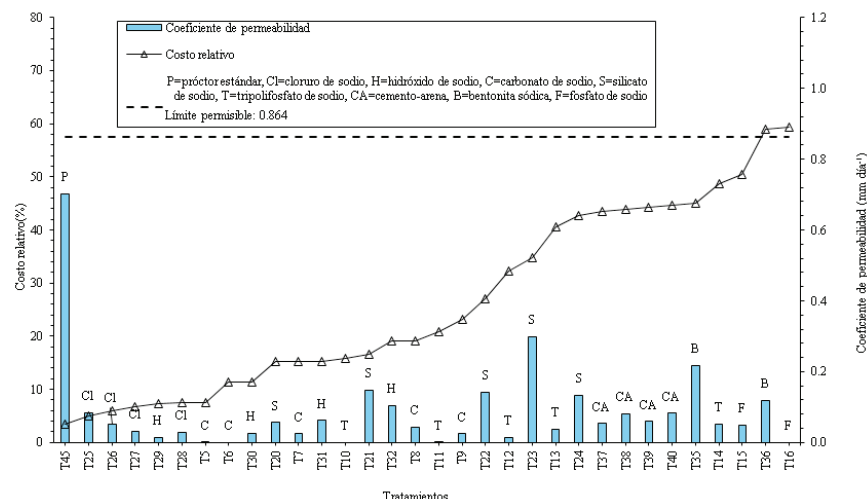


Figura 9. Comparación entre el coeficiente de permeabilidad y el análisis económico de los tratamientos efectivos.

Figure 9. Comparison between the permeability coefficient and economic analysis of effective treatments.

CONCLUSIONES

Los mejores tratamientos en cuanto a reducción de la permeabilidad fueron dosis bajas de carbonato de sodio, tripolifosfato de sodio y fosfato de sodio. El tratamiento más económico fue la compactación próctor estándar, sin embargo, no es recomendable por presentar valores inestables de permeabilidad a través del tiempo. Los tratamientos con dispersantes de partículas son recomendables, en términos económicos y de control de la infiltración, aunque hay que considerar aplicaciones de mantenimiento cada dos o tres años. El uso del cemento-arena y la bentonita sódica resultaron muy eficaces, aunque sus costos son los más elevados tienen la ventaja de ser alternativas duraderas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos originales se encuentran disponibles en la tesis de Maestría de la autora principal, depositada

en el Centro de Documentación del Colegio de Postgraduados.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia” en esta sección.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Idea principal de la investigación: D.S.F.R. Análisis de datos: M.F.C. y D.S.F.R. Redacción: M.F.C. y D.S.F.R. Análisis químico del suelo. M.F.C. y RCG. Fase experimental. M.F.C., D.H.D. y J.D.R.B. Análisis elemental de arcilla. M.F.C., R.C.G. y P.S.G.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por el financiamiento de la beca de estudios de Maestría de la autora principal.

LITERATURA CITADA

Ahmad, S., Aslam, M., & Shafiq, M. (1996). Reducing water seepage from earthen ponds. *Agricultural Water Management*, 30(1), 69-76. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01203-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01203-6)

- ASTM (American Society for Testing and Materials). (1985). *Standard test method for classification of soils for engineering purposes*. American Society for Testing and Materials, ASTM Designation D 2487-83, Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Volume 04.08, 395-408.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2012). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. ASTM D698-12e2. Consultado el 04 de mayo, 2020, desde <https://www.astm.org/Standards/D698.htm>
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2017a). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes* (Unified Soil Classification System). ASTM D2487-17e1. Consultado el 05 de octubre, 2020, desde <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2017b). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. ASTM D4318-05. Consultado el 01 de mayo, 2020, desde <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm>
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2019). *Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization*. ASTM D6276-19. Consultado el 18 de julio, 2020, desde <https://www.astm.org/Standards/D6276.htm>
- Barreto F., F. L., Carvalho G., H. O., & Gheyi, H. R. (2003). Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1), 403-407. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200037>
- Brady, N. C. (1984). *The nature and properties of soils* (9th ed.). New York, N.Y., USA: Macmillan Publishing Company.
- Chapman, H. D. (1965). Cation-exchange capacity. In A. G. Norman (Ed.). *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9.2 (pp. 891-900). Madison, WI: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6>
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). *Permeabilidad del suelo*. Consultado el 28 de abril, 2020, desde: http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm#top.
- Fielde, M., & Perrott, K. W. (1966). *The nature of allophane in soils: Rapid field and laboratory test for allophane, Part 3*. New Zealand: Government Printer.
- Fisher, R. V., & Schmincke, H. U. (1984). *Pyroclastic Rocks*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hernández S., J. M. D., Fernández R., D. S., Martínez M., M. R., Figueroa S., B., Rubio G., E., & García R., J. L. (2019). Evaluación de la estabilidad de taludes en cárcavas, Huasca de Ocampo, Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 303-313. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.468>
- Herrier, G., Puiatti, D., Chevalier, C., Froumentin, M., Bonelli, S., & Fry, J. J. (2013). Lime treatment: New perspectives for the use of silty and clayey soils in earthen hydraulic structures. In 9th Icold European Club Symposium (pp. 1-11). Venise, Italy: ICOLD_CIGB <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01548437/document>
- 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. Hidalgo, México: INEGI.
- Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño: 05 Diseño de un relleno sanitario manual. Parte I*. Lima, Perú: OPS/CEPIS/OMS.
- Kunze, G. W., & Dixon, J. B. (1986). Pretreatment for mineralogical analysis. In A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods* (pp. 91-100). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c5>
- Lenz, O. (2016). Zonificación geotécnica de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México. *Revista Digital Del Cedex*, 181(1), 77-88.
- McConkey, B. G., Reimer, C. D., Nicholaichuk, W., & Jame, Y. W. (1990). Sealing earthen hydraulic structures with enhanced gleization and sodium carbonate II. Application for lining an Irrigation. *Canadian Agricultural Engineering*, 32(2), 171-176.
- Mendoza-Aly, W. F., Salgado V., L. M., Valladares P., R. A., López M., H. R., Marcía C., N., & Antonio V., F. (2018). 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. *Sices*, 1(1), 63-70.
- Neff, E. L. (1980). Using sodium carbonate to seal leaky stock ponds in eastern Montana. *Journal of Range Management*, 33(4), 292-295. <https://doi.org/10.2307/3898076>
- Nerinx, N., Bonelli, D., Puiatti, D., Herrier, G., Fry, J. J., Tourment, R., & Nicaise, S. (2016). *Impact of lime treated soils performance on design of earthfill dams and dikes*. In 84th Icold Annual Meeting: Appropriate Technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries (pp. 129-138). Johannesburg, South Africa: ICOLD_CIGB.
- Nicholaichuk, W. (1978). Seepage control in excavated earthen reservoirs. *Canadian Agricultural Engineering*, 20(2), 97-101.
- Ono, E. A., & Kubitz, F. (2003). Construcción de estanques y de estructuras hidráulicas para el cultivo de peces. Parte 4. *Panorama da Aqüicultura*, 13(75), 1-10.
- Payán A., M. de L., Tuyub S., L., & Cetina M., J. A. (2017). Diseño de suelo-cemento para la impermeabilización de sitios de disposición final. *Multidisciplinarias de la Ingeniería*, 5(5), 92-102.
- Pepper, R. G. (1983). *Chemical sealing of small earth dams using sodium tripolyphosphate*. Department of Agriculture and Food, Western Australia, Perth. [Technical Bulletin 67].
- Pfost, D. L., Williams, D., & Koenig, R. (1997). *Reducing pond seepage* (G1555). Columbia, MO, USA: University Extension, University of Missouri. Recuperado de <https://extension.missouri.edu/publications/g1555>
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Rodríguez Suárez, M. A., & López Alanis, O. J. (2019). *Costos horarios de maquinaria*. México: Centro Nacional de Ingeniería de Costos.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000.

- Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. México: SEGOB.
- Shainberg, I., & Letey, J. (1984). Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52(2), 1-57. <https://doi.org/10.3733/hilg.v52n02p057>
- Teichert-Coddington, D. R., Peralta, M., & Phelps, R. P. (1989). Seepage reduction in tropical fish ponds using chicken litter. *Aquacultural Engineering*, 8(3), 147-154. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(89\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0144-8609(89)90024-1)
- Toirac Corral, J. (2008). El suelo-cemento como material de construcción. *Ciencia y Sociedad*, 33(4), 520-571. <https://doi.org/10.22206/cys.2008.v33i4.pp520-71>
- USDA (United States Department of Agriculture). (2012). *Chapter 3, Engineering Classification of Earth Materials, National Engineering Handbook, Part 631*. Consultado el 04 de mayo, 2020, desde <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=31847.wba>
- Walkley, A., & Black, I. A. (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(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, Pearson Education.