

COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE DOS AGENTES QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO

—

Julio César Tique Zapata
jcesar_tz94@hotmail.com

René Sebastián Mora Ortiz
rene.mora@ujat.mx

Sergio Alberto Díaz Alvarado
alberto.diaz@ujat.mx

Francisco Magaña Hernández
francisco.magana@ujat.mx

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO, DIVISIÓN ACADÉMICA DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA, TABASCO, MÉXICO



Para citar este artículo:

Escobar, N., Lara, M. y Núñez, G. (2019). Concentración y dispersión espacial como una estrategia de sobrevivencia de los pueblos indígenas de Hidalgo. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo. Vol. VIII* (19). Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.31644/IMASD.19.2019.a08>

RESUMEN

Durante la ejecución de obras de ingeniería es común que el suelo que se desea utilizar no cumpla con los criterios de calidad que la normativa correspondiente exige para garantizar la estabilidad estructural de la obra. Para aquellos casos en los que el valor del índice de plasticidad del suelo excede el máximo permitido, la estabilización química ha demostrado los mejores resultados. En esta investigación se realizó un análisis comparativo del rendimiento del óxido de calcio (CaO) o cal viva, y el cloruro de sodio (NaCl) o sal de mesa, como agentes estabilizadores. Se agregaron estos agentes químicos en distintas proporciones al suelo en estudio y se monitorizaron las variaciones del límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad. Los resultados demostraron, contrario a lo que tradicionalmente se espera, que para el caso del suelo en estudio el mejor agente estabilizador es el cloruro de sodio o sal de mesa, debido a que no solo es más efectivo en disminuir el índice de plasticidad, sino que además es más barato que la cal.

Palabras Clave

Arcilla; cloruro de sodio; índice de plasticidad; óxido de calcio.

COMPARISON OF TWO CHEMICAL AGENTS' PERFORMANCE IN THE STABILIZATION OF A CLAY SOIL

— Abstract—

During the execution of engineering Works, it is common that the soil that one wishes to use does not meet the quality criteria that the corresponding regulations require to guarantee the structural stability of the structures. For those cases in which the value of the soil plasticity index exceeds the maximum allowed, the chemical stabilization has shown the best results. In this research, a comparative analysis of the performance of calcium oxide (CaO) or quicklime, and sodium chloride (NaCl) or salt, as stabilizing agents. These chemical agents were added in different proportions to the soil under study. The variations of the liquid limit, plastic limit, and the plasticity index were monitored. The results showed, contrary to what is traditionally expected, that for the case of the soil under study the best stabilizing agent is sodium chloride, because not only is it more effective in reducing the plasticity index, but also is cheaper than the quicklime.

Keywords

Calcium oxide; clay; plasticity index; sodium chloride.

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, que tiene su origen en la descomposición de las rocas debido a la acción de los agentes del intemperismo. Los mecanismos de ataque a las rocas pueden clasificarse en dos grupos: mecánicos y químicos. Partiendo de numerosos minerales (principalmente silicatos) que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de la descomposición química llegan a un producto final: la arcilla (Juárez y Rico, 2005). El comportamiento hidromecánico de estos suelos se ve decisivamente influenciado por su estructura y por su constitución mineralógica. Las arcillas son suelos cuyo tamaño de partículas es menor de 0.002 mm y están constituidas por silicatos de aluminio hidratado, presentando en algunas ocasiones silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y sus átomos están dispuestos en forma laminar, habiendo dos tipos de tales láminas: silícica y aluminica (Braja, 2001). La superficie de cada partícula de arcilla posee carga eléctrica negativa. La intensidad de dicha carga está en función de la estructuración y composición de la arcilla. Así cada partícula atrae a los iones positivos del agua [Juárez y Rico, 2005]. Esta característica de los suelos arcillosos da origen a una propiedad muy importante: la plasticidad. Esta propiedad ocasiona que algunos suelos cambien su consistencia en función de su contenido de humedad, es decir, cuando los suelos arcillosos están secos muestran gran resistencia y muy poca deformabilidad, pero al humedecerse pierden gran parte de esa resistencia volviéndose suelos muy compresibles. El parámetro que permite cuantificar la plasticidad en los suelos es el índice de plasticidad (IP), que se define como la diferencia entre el límite líquido (contenido de agua en porcentaje para el cual un suelo pasa de un estado plástico a líquido) y el límite plástico (contenido de agua en porcentaje para el cual un suelo pasa de un estado semisólido a plástico). En general, se considera que cuando el IP es mayor a 18% se presenta inestabilidad volumétrica en las arcillas.

Desde el punto de vista del ingeniero civil, todo lo anterior hace de las arcillas un material complicado de trabajar que regularmente no cumple con los requerimientos mínimos que las normas de construcción exigen para ser utilizado en proyectos constructivos (carreteras, cimentaciones, presas de tierra, etc.). Sin embargo, la abundancia de los suelos arcillosos y la necesidad de utilizarlos como material de construcción ha propiciado que en años recientes se desarrollen técnicas que contribuyan a mejorar las propiedades ingenieriles de estos suelos. Los procedimientos de estabilización de suelos tienen como principales objetivos aumentar la resistencia y disminuir la variación volumétrica ante cambios en su contenido de humedad. Los métodos para estabilizar suelos se clasifican en dos categorías: estabilización mecánica y estabilización química. La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual, mezclado

con el suelo, produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo. Por su parte, la estabilización mecánica es la alteración de las propiedades del suelo cambiando su granulometría, ya sea mezclándolo con otros suelos o por compactación (De Solminihac y Thenoux, *sf*).

La mejora del comportamiento de los suelos arcillosos se consigue esencialmente disminuyendo el valor del índice de plasticidad (IP), entre más pequeño sea este valor mejor será su desempeño desde el punto de vista del ingeniero constructor. Para lograr lo anterior, la estabilización química es la que ha demostrado mejores resultados (Nuñez, 2011; Kalkan, 2011). En este tipo de estabilización, la mejora de las propiedades del suelo depende principalmente de las reacciones químicas entre el agente estabilizador y los minerales del suelo, es decir, la elección de un tipo de agente químico depende esencialmente del tipo de suelo.

Desde hace varios años se han probado diversos productos químicos para estabilizar suelos arcillosos, en la mayoría de los casos se obtuvieron resultados satisfactorios. Sin embargo, el costo y la disponibilidad de estos productos han hecho que solo se utilicen algunos de ellos (Little, 1999). Dentro de los agentes químicos que se han utilizado con éxito destacan el cloruro de sodio ($NaCl$) (Garnica *et al.*, 2002; Roldan, 2010; Abood *et al.*, 2007), y el óxido de calcio (CaO) (Olinid₁ y Olinid₂, 2016- Jawad *et al.*, 2014). El presente artículo compara el rendimiento de estos dos agentes químicos como estabilizadores del suelo arcilloso de la Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), localizada en el municipio de Cunduacán, Tabasco, México. Los resultados permitieron identificar al mejor de los dos agentes estabilizadores para el suelo de esta zona y definir su cantidad óptima de utilización.

METODOLOGÍA

La zona de donde se extrajo el material en estudio está ubicada detrás del Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (C.I.C.T.A.T.) en la Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), en el municipio de Cunduacán, estado de Tabasco, México (figura 1). En esta unidad se encuentran las Divisiones Académicas de Ciencias Básicas (DACB), de Informática y Sistemas (DAIS) y de Ingeniería y Arquitectura (DAIA). Las características básicas originales del suelo utilizado se muestran en la tabla 1. El material en estudio se extrajo a una profundidad de 1.5 m mediante el método PCA (pozo a cielo abierto).



Figura 1. Procedencia del suelo en estudio. Unidad Chontalpa de la UJAT

Tabla 1
Características básicas y clasificación del material

Límite líquido (LL)	69.2 %	Peso específico relativo de sólidos	2.62
Límite Plástico (LP)	49.06 %	Clasificación S.U.C.S*	CH (arcilla de alta plasticidad)
Índice de Plasticidad (IP) = LL - LP	20.14 %	Cantidad de arena	2.41 %

* Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Como se observa en la tabla 1, el suelo es una arcilla de alta plasticidad con 2.41 % de arena. Debido al alto valor del índice de plasticidad ($IP \geq 18$) este suelo es resistente en época de estiaje, pero es susceptible a grandes deformaciones cuando se humedece.

El criterio de mejora del terreno que se siguió en esta investigación fue la disminución del IP , debido a que entre más pequeño sea este valor mejor será el comportamiento del suelo desde el punto de vista del ingeniero constructor.

Los agentes químicos que se utilizaron para reducir la plasticidad del suelo fueron el cloruro de sodio o sal común (grano fino) y el óxido de calcio (cal). Estos agentes se eligieron debido a su gran disponibilidad y bajo costo en esta zona.

La forma en la que se aplicaron los agentes químicos al suelo se describe a continuación. Primero, el suelo se secó al sol por 24 horas, posteriormente se tamizó por la malla número 40 (4.25 mm de abertura). A continuación, el suelo se dividió en dos grupos, A y B (figura 2). Cada grupo estaba compuesto de seis pares de muestras de 300 g de suelo cada una. Estas muestras se colocaron individualmente en vasos de aluminio de 1 litro de capacidad. A cada grupo se le adicionó con un solo agente estabilizador (figura 2). El

agente se agregó a cada par de muestras como un porcentaje de su peso seco (300 g). Los porcentajes utilizados de los agentes químicos en esta investigación fueron 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % y 16 % (figura 2). Es decir, a dos muestras de suelo se les adicionó con 2 % de un agente estabilizador, a otras dos muestras con 4 % del mismo agente químico y así sucesivamente. Se adicionaron dos muestras con el mismo porcentaje de agente químico para tener una lectura redundante y asegurar que los resultados obtenidos fuesen los correctos. La figura 2 esquematiza el proceso descrito anteriormente. Se decidió trabajar con los antes mencionados porcentajes de agente estabilizador (2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % y 16 %) debido a que la bibliografía consultada sugiere que la cantidad óptima de dichos agentes está generalmente entre 5 % y 8 % (Roldán, 2010; Jawad *et al.*, 2014).

Una vez agregado el agente estabilizador al suelo seco se mezcló con la ayuda de una mezcladora de baja velocidad durante 30 minutos a fin de conseguir homogenizar la mezcla. Dicha mezcla se dejó reposar durante 48 horas en una recámara a temperatura constante de 25 °C fuera del contacto directo con los rayos del sol y de la humedad. Después de este periodo de curado se procedió a determinar el límite líquido (LL), límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP) de todas las muestras adicionadas con ambos agentes estabilizadores siguiendo el procedimiento marcado por la norma NMX-C-416-ONNCCE-2003 capítulo 6.

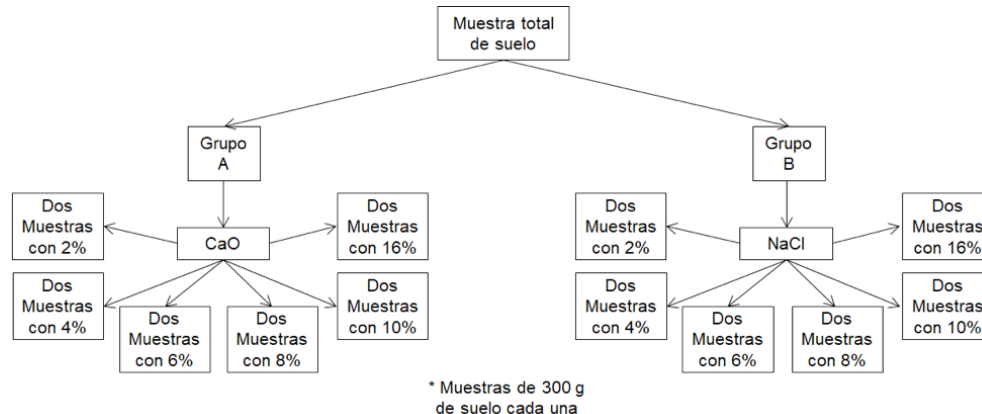


Figura 2. Muestras con diferentes proporciones de CaO y NaCl

RESULTADOS

Para analizar el desempeño de los agentes químicos, se tomaron como control las características de plasticidad original del material (tabla 1). Solo se monitorizaron estas propiedades (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) debido a que la estabilización del suelo busca disminuir las características de plasticidad del material, ya que es bien sabido que al

disminuir éstas, mejoran las características de resistencia y estabilidad volumétrica del suelo.

A continuación, se presentan los resultados de la determinación del límite líquido (figura 3), límite plástico (figura 4) y del índice de plasticidad (figura 5) en todas las muestras adicionadas con los agentes estabilizadores.

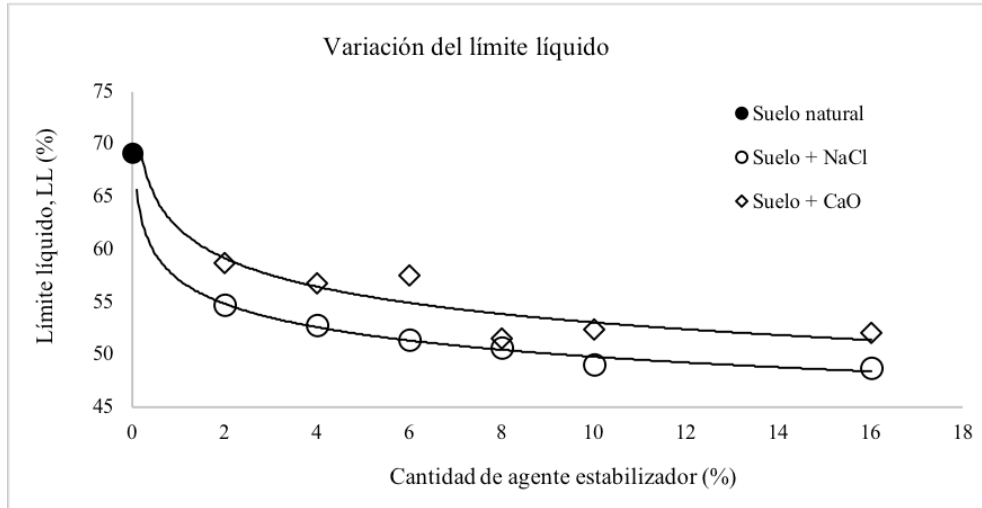


Figura 3. Efecto de los agentes químicos en el límite líquido

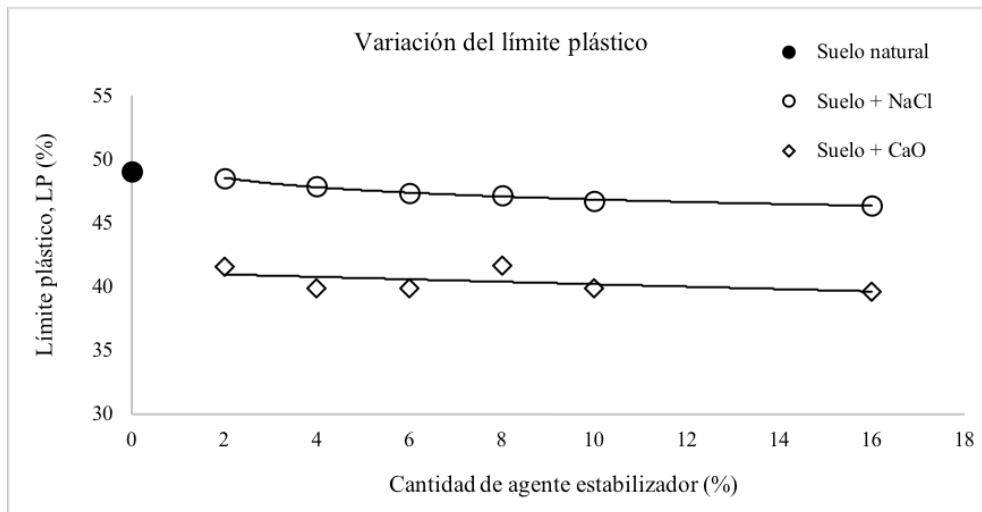


Figura 4. Efecto de los agentes químicos en el límite plástico

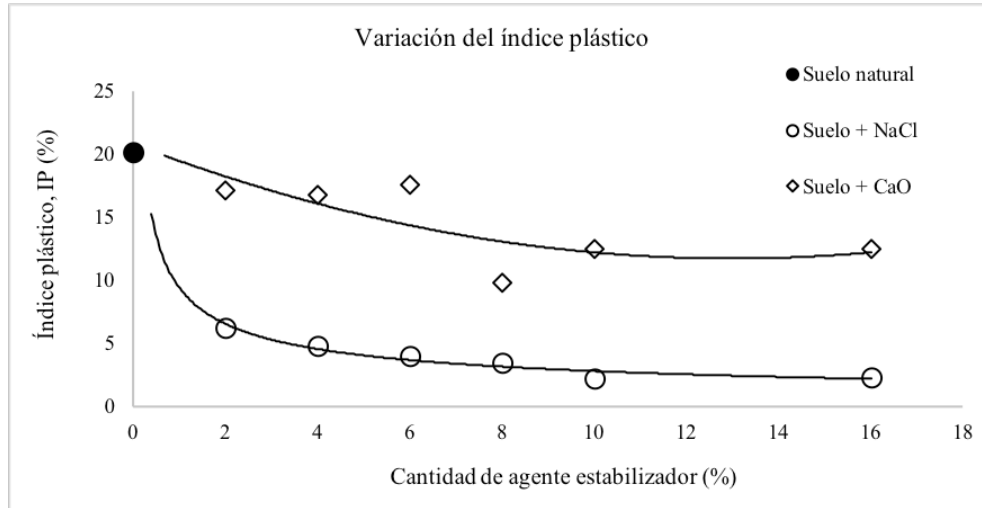


Figura 5. Efecto de los agentes químicos en el índice plástico

Como se observa en la figura 3, ambos agentes químicos disminuyen el valor del límite líquido (LL), siendo el cloruro de sodio (NaCl) consistentemente el más efectivo. Puede verse que cada incremento del porcentaje de NaCl se corresponde con una disminución del LL, generándose una curva de reducción (línea de tendencia). Debe notarse que para el rango de 2 % al 6 % la curva va en franco descenso. A partir del 8 % la curva comienza a hacerse horizontal y a partir del 10 %, es cada vez más plana. Este comportamiento indica que a partir del 10 % de sal los beneficios son prácticamente los mismos que si se agrega al suelo 10 %, 12 %, 14 % ó 16 %. Es decir, a partir del 10 % ya no conviene agregar más sal. Por lo anterior, la cantidad óptima de NaCl para estabilizar este suelo está alrededor del 8 %. Lo anterior implica que, para este tipo de suelo basta con agregar el 8 % de NaCl para obtener los mejores resultados costo-beneficio. Agregar una cantidad mayor de este agente ya no genera una reducción en el límite líquido que amerite el costo de aplicación. De manera similar, en el caso del óxido de calcio la cantidad óptima de estabilización ronda el 8 % (figura 3).

La figura 4 muestra la variación del límite plástico (LP) por efecto de los agentes estabilizadores en el material en estudio. Como puede observarse el NaCl tiene poco efecto sobre el LP del suelo, mostrando una tendencia prácticamente lineal. Un comportamiento similar se observa en las muestras adicionadas con CaO, aunque para este tipo de agente estabilizador se presenta una reducción de LP mayor que en el caso del NaCl.

En cuanto a la variación del índice de plasticidad (IP) en las muestras de suelo, ambos agentes demostraron ser efectivos para reducir este valor (figura 5), sin embargo, fue el NaCl el que mostró mejores resultados.

En la tabla 2 se muestra el porcentaje de reducción de los límites de consistencia con respecto a las características naturales del suelo (tabla 1). Es importante observar que la cantidad óptima de agente químico es la misma en ambos casos.

Se observa que ambos agentes químicos redujeron el límite líquido en aproximadamente un 25 % (con respecto a su valor inicial mostrado en la tabla 1). En cuanto al límite plástico (LP), las muestras que experimentaron mayor reducción fueron las adicionadas con el CaO. El agente químico que demostró ser más eficaz para reducir el índice de plasticidad fue el NaCl, ya que fue capaz de reducir este parámetro en un 88.93 % con respecto a su valor inicial (tabla 1).

Tabla 2

Reducción del LL, LP y IP del suelo por efecto de los agentes químicos

Agente estabilizador	Cantidad óptima por peso seco de suelo	Límite líquido (LL)	Porcentaje de reducción*	
			Límite plástico (LP)	Índice de plasticidad (IP)
NaCl	8 %	25.19 %	4.67 %	88.93 %
CaO	8 %	25.58 %	15.02 %	51.29 %

* Con respecto a la muestra de suelo natural

DISCUSIÓN

La cal (CaO) es uno de los agentes químicos que tradicionalmente se ha utilizado con éxito en la estabilización de suelos. Diversas investigaciones mencionan los efectos positivos de la utilización de este agente (Olinic1 y Olinic2, 2016; Olinic1 y Olinic2, 2014; Aldaood, 2007; Holt y Freer, 1996, Rogers y Glendinning, 1996). Sin embargo, en estas investigaciones no se realizó una comparación del rendimiento de este importante agente con otros agentes estabilizadores. El análisis comparativo entre distintos agentes estabilizadores de suelos es muy importante, ya que el factor de mayor impacto en el éxito de la estabilización es la relación entre el agente estabilizador y los minerales del suelo, es decir, la elección del tipo de agente estabilizador dependerá del tipo de suelo. Por ejemplo, la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (1982) hace notar que la efectividad de la cal como estabilizador se reduce considerablemente en suelos con índice de plasticidad (IP) menor a 10. Este organismo menciona que en los casos en los que los suelos no responden a la cal, se requiere un segundo aditivo puzolánico. El *Fly ash*, material de desecho de las plantas de calcinación de carbón es la puzolana más comúnmente utilizada para este propósito.

En esta investigación se comprobó que para la estabilización del suelo en la zona de estudio el agente químico de mejor rendimiento es la sal de mesa. Se comprobó que, si se agrega 8 % en peso seco de los agentes químicos al suelo, el IP de las muestras que fueron adicionadas con sal disminuye en promedio 37 % más que aquellas a las que se les agregó cal. En lo que respecta a los costos en la zona de estudio de cada agente estabilizador, el kilogramo de sal cuesta en promedio \$ 7.00 pesos, mientras que el kilogramo de cal se vende en \$ 8.00 pesos. Es decir, la sal (NaCl) es aproximadamente 12.50 % más barata.

Es importante tener presente que aún con el mejoramiento logrado por estos agentes estabilizadores puede presentarse la ocasión en la que no se alcancen los límites establecidos por la normatividad vigente (Normas SCT) para poder utilizar estos suelos estabilizados en estructuras de pavimentos de carreteras. En estos casos deben analizarse otras alternativas.

CONCLUSIONES

La abundancia de los suelos arcillosos en la naturaleza crea la necesidad de aprovecharlos como materiales de construcción. El principal problema de trabajar con suelos arcillosos es su alta plasticidad debido a que esta propiedad ocasiona que los suelos cambien su consistencia en función de su contenido de humedad. El índice de plasticidad (IP) es el parámetro mediante el cual se cuantifica la plasticidad en los suelos arcillosos. La manera más eficiente de disminuir la plasticidad es mediante la estabilización química. Tradicionalmente este tipo de estabilización se ha realizado con óxido de calcio (cal). En esta investigación se comparó el rendimiento de este importante agente químico con el cloruro de sodio NaCl (sal de mesa) en la estabilización del suelo arcilloso de la unidad Chontalpa de la UJAT. Para lograr lo anterior, se agregaron distintos porcentajes de estos agentes químicos a diferentes porciones de suelo (figura 2), esto permitió monitorizar los efectos de los agentes estabilizadores sobre el límite líquido (LL), límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP). Los resultados demostraron que, para el suelo en estudio, la cantidad óptima de cada agente estabilizador es 8 %, sin embargo, la sal de mesa (NaCl) es el agente con mejores resultados, ya que para un mismo porcentaje óptimo (8% en peso seco de suelo) reduce el IP un 37 % más que la cal. En lo que respecta al costo (en la zona de estudio) de los antes mencionados agentes estabilizadores, utilizar sal para estabilizar el suelo no solo es más efectivo sino que además es aproximadamente 12.50 % más barato. Otro beneficio de utilizar sal en la estabilización de suelos es que presenta menos volatilidad que la cal, además, la sal representa menor riesgo de salud para el personal que lo aplique. Un aspecto relevante en cuanto a la aplicación de ambos agentes es que puede hacerse a manera de lechada, por lo que su volatilidad es prácticamente nula.

Es importante señalar que la utilización de la sal u otro agente químico como elementos estabilizadores de suelos, pueden propiciar problemas ecológicos y en los casos de contacto con estructuras de concreto armado o acero puede propiciar la corrosión.

La cal es uno de los agentes estabilizadores de mayor éxito a nivel mundial por su efectividad y gran manejabilidad, sin embargo, para el caso particular del suelo analizado en esta investigación el mejor agente estabilizador es la sal de mesa.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abood**, T, Anuar Bin Kasa y Zamri Bin Chik. (2007). Stabilization of silty clay soil using chloride compounds. *J. Eng. Sci. Technol.*, 2: 102-110.
- Aldaood**, A., Bouasker, M. y Al-Mukhtar, M. (2014). Geotechnical properties of lime-treated gypseous soils. *Appl. Clay Sci.* 88, 39–48.
- Asociación** Nacional de Fabricantes de Cal. (1982). *Manual de construcción para la estabilización con cal. Publicación de la National Lime Association.* 3601 North Fairfax Drive Airlington, VA. 22201.
- De Solminihac**, H., Echeverría, G. y Thenoux, G. (sf). *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos.* Tomado de: www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/323/267
- Garnica** Anguas, Pérez Salazar Alfonso, Gómez López José Antonio y Obil Veiza Edda Yhaaraby. (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres.* Publicación Técnica No.201. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro.
- Glendinning**, S. y Rogers, C.D.F. (1996). *Deep stabilisation using lime, Proceedings, Seminar on Lime Stabilization, Loughborough University, Thomas Telford, London*, pp. 127– 136.
- Holt**, C.C. y Freer-Hewish, R.J. (1996). *Lime treatment of capping layers in accordance with the current specification for highway works, Proceedings, Seminar on Lime Stabilisation, Loughborough University, Thomas Telford*, pp. 51–61.
- Jawad**, I.T., Taha, M.R., Majeed, Z.H. y Khan, T.A. (2014). Soil stabilization using lime: advantages, disadvantages and proposing a potential alternative. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 8 (4), 510–520.
- Juárez** Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de Suelos. Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de Suelos.* Editorial Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. México.
- Little**, D.N. (1999). Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates, *Volume 1: Summary of Findings, National Lime Association, 1999* (<http://www.lime.org/SOIL.PDF>).
- Olinic**, E. y Ivasuc, T. (2014). *Soil mix with Quicklime for moisture content reduction to optimum of compactation. Laboratory and Case study. International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. Surveying Geology and mining ecology Management*, 2, pp 809.
- Olinic** Ernest y Olinic Tatiana. (2014). *Soil mix with quicklime for moisture content reduction to optimum of compaction. laboratory and case study.*
- Olinic** Tatiana y Olinic Ernest. (2016). *The effect of Quicklime Stabilization on Soil Properties.* Agriculture and Agricultural Science Procedia 10 444 – 451. doi: 10.1016/j.aaspro.2016.09.013.

Rogers C.D.F. y **Glendinning, S.** (1996). *Modification of clay soils using lime, Proceedings, Seminar on Lime Stabilization, Loughborough University, Civil and Building Engineering Department, London*, pp. 99–114.