

Stabilization of soils through the use of oily sludge

Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso

J. Alarcón ^{1*}, M. Jiménez *, R. Benítez *

* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Tunja, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 17/07/2019

Fecha de Aceptación: 05/01/2020

PAG 5-20

Abstract

This study of soil stabilization emerges as an alternative in road construction to replace the conventional materials used in the granular layers and/or to improve the subgrade of the pavement structures, while taking advantage of the waste from oil extraction, in an attempt to mitigate the negative impacts on the environment. Soils from the Tunja region were used. A granular material and a clayey subgrade soil were characterized and later mixed with different percentages of oily sludge. Different tests were conducted to determine the properties and analyze the possible behavior in the field with each mixture, among them the CBR and resilient modulus. It was determined that with the addition of 6% sludge the best results are obtained referring to improving the properties of resistance and plasticity of the granular material and 4% for the subgrade, with curing periods of 26 days.

Keywords: Soil stabilization, oily sludge, resilient modulus, subgrade, plasticity

Resumen

El estudio de estabilización de suelos surge como alternativa en la construcción de vías para reemplazar los materiales convencionales usados en las capas granulares y/o mejorar la subrasante de las estructuras del pavimento, a la vez que se aprovechan los residuos de la extracción del petróleo, buscando mitigar los impactos negativos al medio ambiente. Se emplearon suelos de la región de Tunja; un material granular y un suelo arcilloso de subrasante los cuales fueron caracterizados y posteriormente mezclados con diferentes porcentajes de lodo aceitoso, a cada mezcla se le realizó diferentes ensayos para determinar las propiedades y analizar el posible comportamiento en campo, entre ellos el CBR y módulos resilientes. Se determinó que con la adición del 6% de lodo se consiguen los mejores resultados referentes a mejorar las propiedades de resistencia y plasticidad del material granular y 4% para la subrasante, con periodos de curado de 26 días.

Palabras clave: Estabilización de suelos, lodo aceitoso, módulo resiliente, subrasante, plasticidad

1. Introducción

En un país en desarrollo como Colombia, en el cual su principal medio de transporte es por carretera, la necesidad de infraestructura vial va en aumento demandando materiales de calidad, que muchas veces son de difícil consecución. Ante tal situación surgen alternativas constructivas, entre ellas, la estabilización de suelos con diversos agentes estabilizantes como asfalto, cemento, cal y los aceites que mejoran propiedades ingenieriles de los suelos y los hacen aptos para su utilización en las diferentes capas de un pavimento.

En este estudio se analizó la factibilidad de usar lodo aceitoso como agente estabilizante de materiales granulares y suelos de subrasante, buscando mejorar propiedades de resistencia y plasticidad y a su vez aprovechar los residuos de la extracción del petróleo, en aras de mitigar los impactos negativos al medio ambiente generados por estos. Para lo anterior se caracterizó los materiales a estabilizar y el agente estabilizante, se realizaron mezclas adicionando diferentes porcentajes de lodo aceitoso a los materiales mencionados y a cada mezcla se le realizó ensayos de resistencia, plasticidad y estabilidad hídrica, tendientes a determinar el posible comportamiento del nuevo material y el porcentaje óptimo de lodo por utilizar.

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia –
Tunja, COLOMBIA
E-mail: joserodrigo.alarcon@uptc.edu.co

2. Metodología

La metodología utilizada comprende básicamente cuatro etapas principales.

2.1 Revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó una exhaustiva revisión del estado del arte referente a los diferentes métodos y agentes de estabilización de suelos y a los lodos aceitosos producto de la extracción del crudo, y se definió el tipo de estabilización a utilizar en la investigación.

2.2 Caracterización de materiales

Se realizó la recolección del material granular, de subrasante y lodo aceitoso con su respectiva caracterización física, química y mecánica.

2.3 Realización de estabilizaciones

Se realizó las mezclas de material granular y de subrasante con diferentes porcentajes de lodo aceitoso como agente estabilizante, a cada mezcla se le realizaron ensayos de caracterización.

2.4 Análisis de resultados

En esta etapa se realizó el análisis técnico, económico y de factibilidad constructiva de estabilizar suelos con lodo aceitoso y su porcentaje recomendado para el material granular y de subrasante.

3. Marco Teórico

Las operaciones en los campos petroleros incluyen el manejo en subsuelo o superficie de aguas de formación asociadas a la producción de hidrocarburos, en Ecopetrol, para mitigar el impacto ambiental causado por estas condiciones, ha decidido implementar en el área de la estación Acacias, un sistema de manejo eficiente de lodos, a través de un procedimiento combinado de separación de aceite y posterior deshidratación de las borras obtenidas, para disminuir los volúmenes que se transportan, y a la vez, recuperar parte del aceite que se pierde con este material. (Tecca, 2014) página 3.

3.1 Lodo aceitoso

“Es posible deducir que en el piedemonte llanero se han evidenciado similares conflictos e impactos ambientales ocasionados por el desarrollo de la actividad petrolera” (Vargas y León, 2016), página 19.

Actualmente los lodos generados en el área de Apiay son tratados con Biorremediación, práctica ambiental eficiente para el tipo de residuo generado, ya que permite reducir o remover los residuos potencialmente peligrosos presentes en suelos, lodos, aguas superficiales, subterráneas y residuales; así como gases. (Garzón et al., 2017), página 4.

En los últimos años el volumen de lodo aceitoso se ha incrementado significativamente, lo que ha llevado a la implementación de diferentes proyectos para dar una disposición o uso alternativo al material logrando mitigar el impacto ambiental que se produce en el lugar de almacenamiento. “Uno de los métodos de manejo de los lodos aceitosos es su reutilización en el revestimiento en carreteras” (Méndez et al., 2013), página 12.

3.2 Estabilización de suelos

La estabilización de suelos tiende a mejorar propiedades físicas, mecánicas y de resistencia, con permanencia en el tiempo. El diseño de una estabilización con aditivo incluye clasificar el suelo, determinar el tipo y cantidad de estabilizante y el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado. Es difícil establecer patrones de estabilización de materiales, sobre todo cuando se tiene una gran diversidad de métodos de diseño de pavimentos. (Bada, 2016), página 16.

Hay que entender los mecanismos de estabilización de los productos no tradicionales, a la vez que definir con claridad, el objetivo que se busca con la estabilización, esto para efectuar la elección correcta del producto a utilizar. En este proceso pueden intervenir muchas variables como el tipo de suelo o material existente, características de la ruta, clima y otros. (Ulate, 2017), página 4.

El diseñador de pavimentos debe, cuando no dispone de materiales aptos para la construcción de las capas del pavimento, tomar la decisión sobre el tipo de tratamiento de estabilización más adecuado para hacerlos aptos para la construcción de dichas capas, igual pasa en el caso de las subrasantes débiles. La solución pasa por tratar el suelo con aditivos, es decir someterlos a cierta manipulación o tratamiento de modo que se pueda aprovechar sus



mejores cualidades, obteniéndose un suelo estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

Hoy por hoy en Colombia es de uso frecuente la estabilización química de suelos, sea con cal, cemento, polímeros o aditivos químicos. (Chavarro y Molina, 2015), página 101. Las principales ventajas de la estabilización química son que el tiempo de fraguado y el tiempo de curado pueden controlarse. Sin embargo, la estabilización química es generalmente más costosa que otros tipos de estabilización y puede causar riesgos ambientales. (Olaya, 2018), página 59.

Cada técnica de estabilización de suelos tiene unas especificaciones particulares y unos ensayos distintos para medir la efectividad de la estabilización mediante la medición de la resistencia a la compresión, índices de plasticidad, entre otros. (Álvarez, 2015), página 16.

4. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización del material granular

La curva granulométrica se asemeja a un afirmado A-25, como se observa en la (Figura 1).

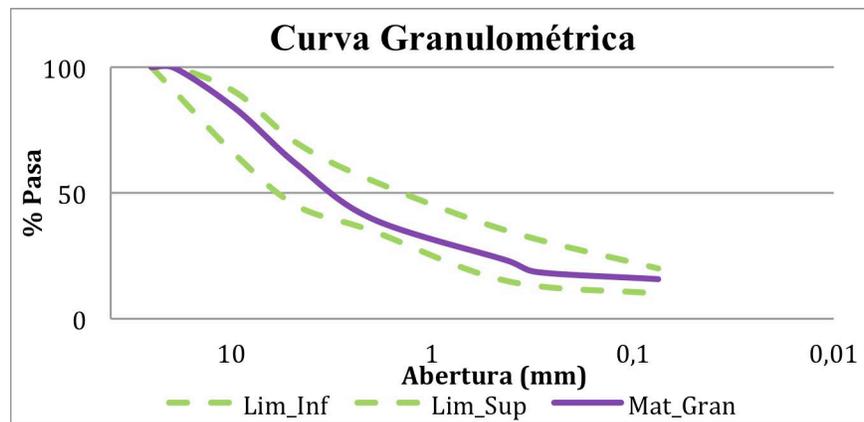


Figura 1. Curva granulométrica del material granular y afirmado A-25. Fuente: Los Autores

Según la SUCS, el material está compuesto por 15.8% de finos, 45.7% de arena y 38.5% de grava y se clasifica como un limo, y según la AASHTO, se clasifica como A-2-4. La curva de compactación del ensayo Proctor Modificado aparece en la (Figura 2).

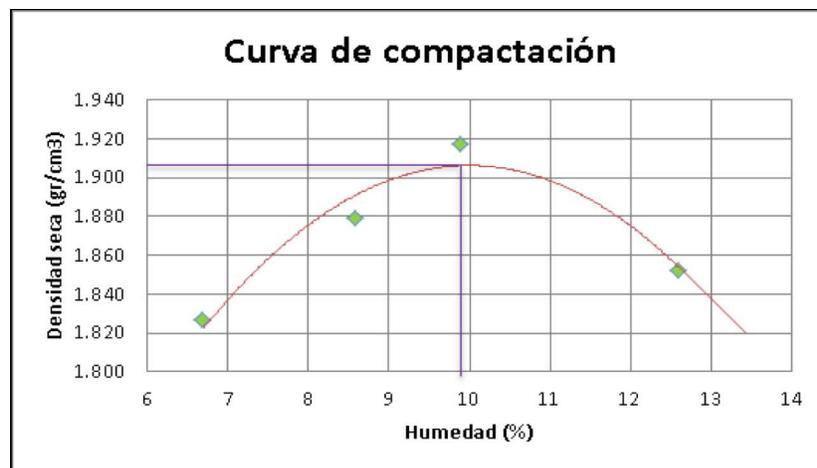


Figura 2. Curva de compactación del material granular. Fuente: Los Autores

La relación de vacíos es de 0.318, es decir un suelo relativamente compacto y con poca absorción de agua y una porosidad de 0.24 indicando que el suelo presenta baja capacidad de absorber agua.

El material granular presenta un CBR promedio de 30% al 90% de la densidad seca, con una expansión máxima de 0.44%, baja, probablemente no genera mayores problemas en la estructura de un pavimento. Otros ensayos realizados al material granular se muestran en la (Tabla 1).

Analizando en conjunto los resultados de los ensayos de caracterización del material granular, a la luz de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (INVIAS, 2013), el agregado cumple como un afirmado A-25, exceptuando el contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable el cual está por encima del porcentaje máximo permitido. La plasticidad es del 8%, un poco alto dado la presencia de material arcilloso determinado en la granulometría del material.

Tabla 1. Resultado ensayos de caracterización del material granular

Ensayo	Norma INV	Requisito	Resultado	Cumple
Desgaste en máquina de los Ángeles (%)	218	Máximo 50	40	Sí
Solidez en sulfato de magnesio (%)	220	Máximo 18	4.7	Sí
Limite líquido (%)	125	Máximo 40	35	Sí
Limite plástico (%)	125	...	27	...
Índice de plasticidad (%)	125-126	4 a 9	8	Sí
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable (%)	211	Máximo 2	5.4	No
CBR (%): asociado al 90% de la densidad seca máxima y sometido a 4 días de inmersión	148	≥ 15	30	Sí

Fuente: Los Autores

4.2 Caracterización del material de subrasante

El índice de plasticidad es 17%, un poco alto para un suelo de subrasante. Según la SUCS, se determinó que el material es una arena con presencia de arcillas o limos o arena arcillosa (SM). Según AASHTO, es un suelo A-2-6.

Ensayo de compactación Proctor Modificado tipo A. Se obtiene como densidad seca máxima 1.92 gr/cm³ y humedad óptima de compactación 12%.

Ensayo de ascensión capilar. En la (Figura 3) se muestra la evolución del ensayo, en la cual se observa que la mayor pendiente de ascensión se da en los primeros 80 minutos con el 40%, a partir de ahí el incremento es del 10% para cada uno de los intervalos adoptados para el ensayo, hasta llegar a una ascensión en la totalidad de la probeta a las 6 horas de iniciado el ensayo.

Ensayo de absorción capilar. La adición de productos químicos al suelo de subrasante se perfila como una solución interesante para estudiar, aprovechando las condiciones iniciales de los terrenos procurando elevar la resistencia, con la respectiva densificación de la estructura y las implicaciones que esto acarrearía en el retardo en la absorción de agua por el conjunto de capas del pavimento. (Díez et al., 2015), página 2. En la (Figura 4) se observa el incremento de peso por unidad de área de la probeta, teniéndose el mayor incremento en el intervalo de tiempo de 1 hora.



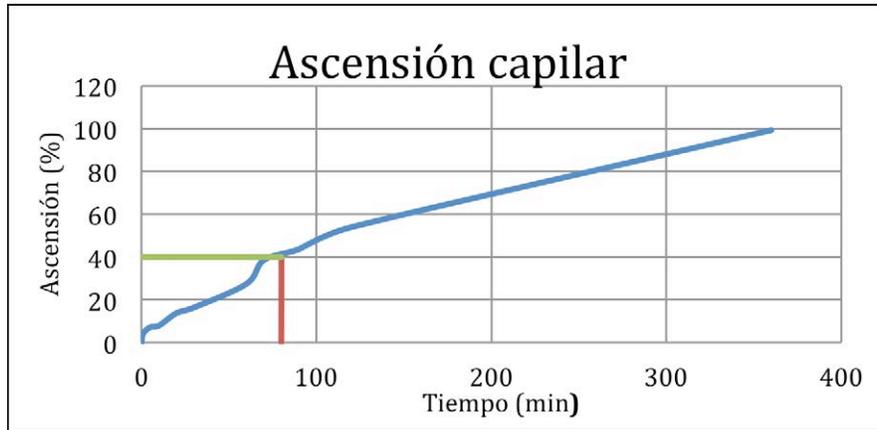


Figura 3. Curva ascensión capilar para material de subrasante. Fuente: Los Autores

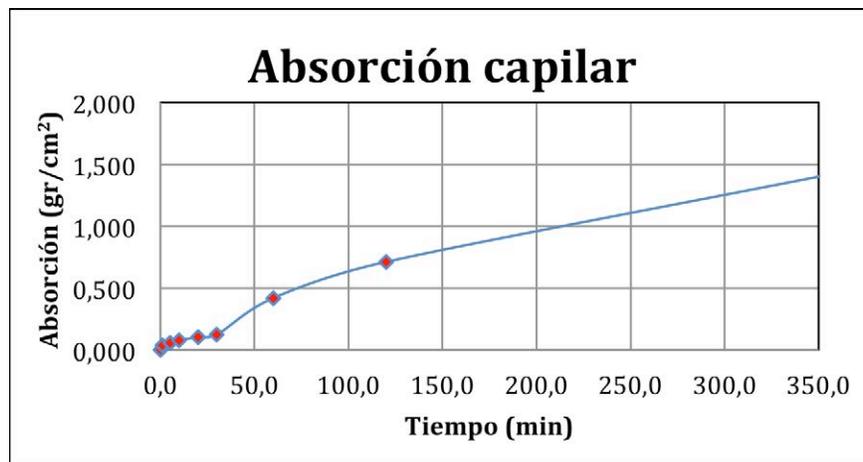


Figura 4. Curva de absorción capilar del material de subrasante. Fuente: Los Autores

Debido al alto potencial de absorción del material de subrasante, se produjo la desintegración de la briqueta rápidamente, el colapso se produjo a las 6 horas de iniciado el ensayo, como se observa en la (Figura 5).



Figura 5. Briquetas después del ensayo de absorción capilar. Fuente: Los Autores

Estabilidad hídrica. Luego de la inmersión, inmediatamente se presentó gran pérdida de material, a los 30 minutos de inmersión, hay pérdida de material en mayor medida como se observa en la (Figura 6). A las 8 horas de ensayo se produce el colapso total de la probeta.



Figura 6. Ensayo de estabilidad hídrica a los 30 minutos. Fuente: Los Autores

4.3 Caracterización del agente estabilizante - lodo aceitoso

Por medio del ensayo de fluorescencia de rayos x se determinó la composición química del lodo aceitoso, en la (Figura 7) se muestra el espectro obtenido.



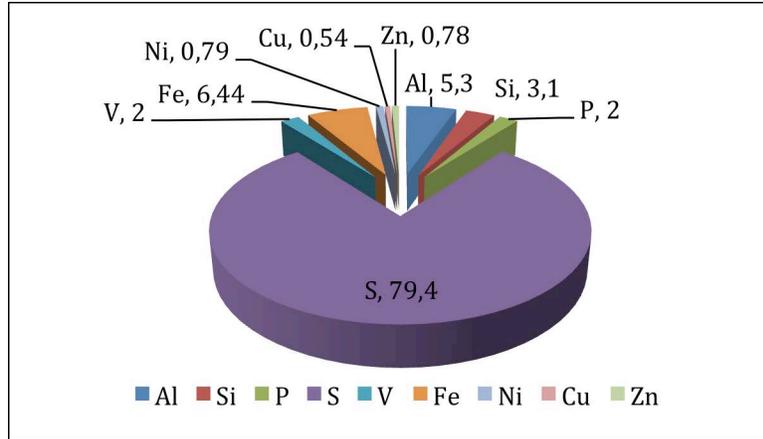


Figura 7. Espectro de composición química del lodo aceitoso. Fuente: Los Autores

Según la densidad relativa del lodo en estudio, su gravedad API es 10, que, de acuerdo con la clasificación establecida para los crudos por (Peralta et al., 2017), p.8., es un crudo extra pesado.

4.4 Proceso de estabilización

A falta de un procedimiento normado para la estabilización con lodo aceitoso y siguiendo la tendencia general en las estabilizaciones, se decidió elaborar mezclas con la adición de diferentes porcentajes de lodo aceitoso con el fin de identificar el mejor comportamiento o tendencia de desempeño del material estabilizado mediante la medición de ciertas características físicas y de resistencia.

En la carretera La Primavera – Puerto Carreño, se evaluó las propiedades de resistencia y durabilidad de los suelos arcillosos de baja plasticidad, mediante la adición de silicato de sodio, se elaboraron muestras compactadas en laboratorio y curadas en condiciones ambientales controladas de humedad relativa y temperatura, representativas de la zona en estudio. Se utilizaron diferentes porcentajes de silicato de sodio, para edades de 0, 7 y 14 días, para seleccionar el porcentaje óptimo de sales, que permitiera obtener las mayores resistencias en ensayos de compresión y las menores pérdidas en el ensayo de desleimiento durabilidad (Caballero, 2017), página 9.

En la (Figura 8) aparece el diseño experimental utilizado para los procesos de dosificación, elaboración, curado y ensayo de las mezclas de material granular y subrasante con lodo aceitoso.



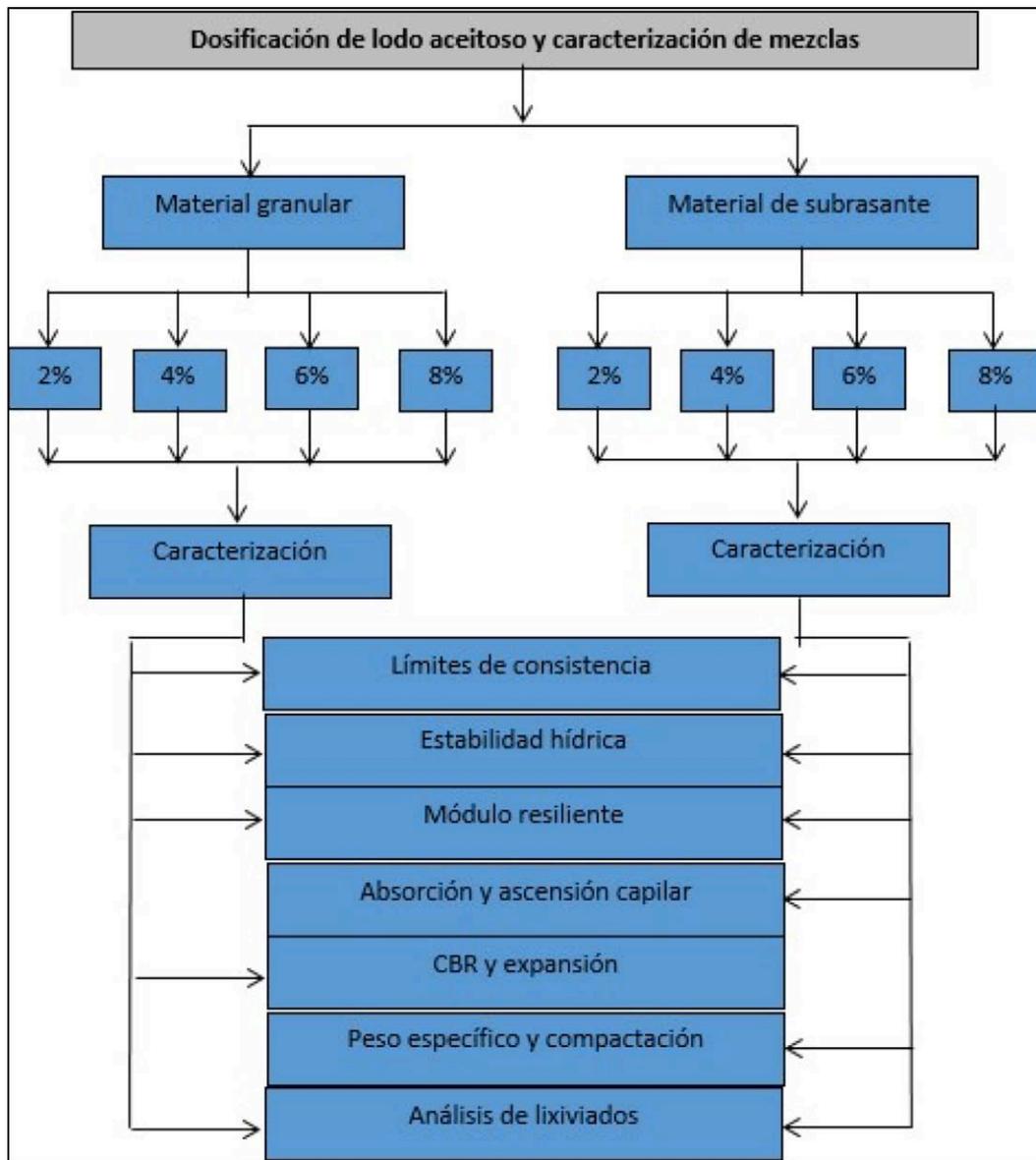


Figura 8. Diseño experimental de la investigación. Fuente: Los Autores

4.4.1 Resultados de la estabilización del material granular

Se determinó el CBR de la mezcla para el 2%, 4%, 6% y 8% de lodo aceitoso y para curado durante 4 días en inmersión; en seco durante 14 días y curado de 14 días con 7 días en inmersión y 7 días en seco.

La tendencia general indica que el mayor aumento de CBR del material estabilizado, respecto al material no tratado (30%), se da con la adición del 4% de lodo y periodo de curado de 14 días en seco (52%). Así mismo, el material no tratado aumenta su CBR con 4% de lodo, independientemente del periodo de curado, en todos los casos, como se observa en la (Figura 9).



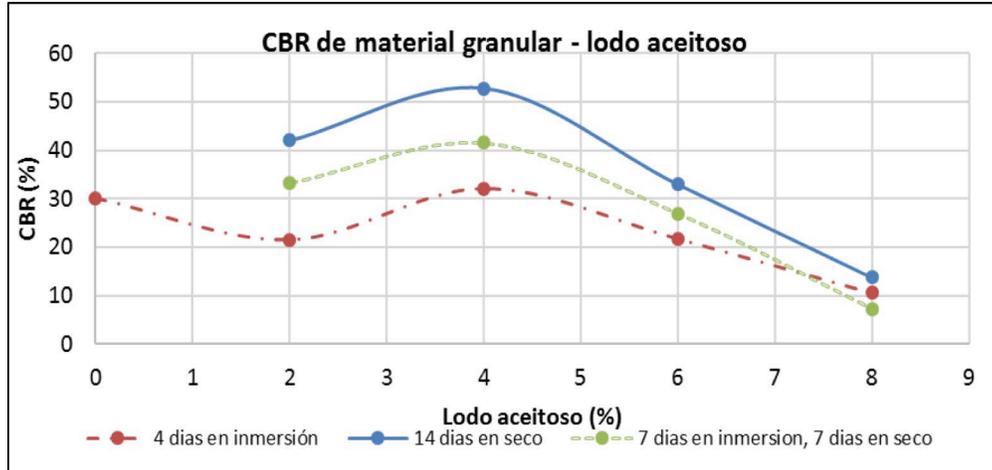


Figura 9. CBR de material granular - lodo aceitoso. Fuente: Los Autores

Se determinó la expansión a las muestras de CBR, concluyendo que todas las medidas de expansión para las muestras estabilizadas son menores a la expansión del material no tratado, es decir, el lodo agregado al material hace que se disminuya el efecto del agua sobre el material granular. En la (Figura 10) se muestra la magnitud de la reducción en los valores de expansión.

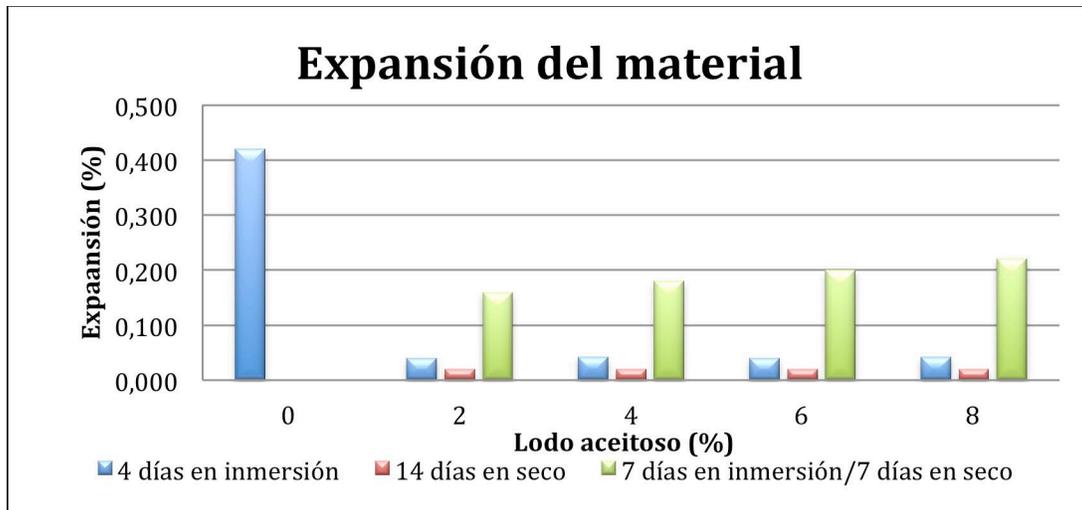


Figura 10. Expansión del material. Fuente. Los Autores

La estabilidad hídrica se realizó a las briquetas del ensayo CBR para las muestras sin y estabilizadas, en la (Figura 11) se muestra aspectos de realización del ensayo, la briketa sin estabilizar presentó una ligera pérdida de material a los 5 minutos, a las 11 horas se desintegró en un 60%, luego de 24 horas falló en más del 90% y se destruyó al quinto día; las probetas estabilizadas no presentaron variación alguna en ningún momento.





Figura 11. Estabilidad hídrica luego de 24 horas de ensayo. Fuente. Los Autores

La adición de lodo aceitoso al material granular hace que este baje su plasticidad del 8% a N.P. a partir del 6% de lodo; con el 4% de lodo baja hasta el 7%; es decir el efecto favorable, en esta propiedad en el material granular ocurre con adición de lodo por encima del 6%.

La baja sensibilidad a la presencia de agua producido por el lodo aceitoso sobre el suelo granular es de gran utilidad, si se tiene en cuenta que el comportamiento de los suelos compactados, depende de su densidad seca máxima y de su contenido de agua. En los suelos de baja plasticidad, los cambios de humedad producen deformaciones por colapso cuando se humedecen, esta deformación se acentúa en suelos poco compactados, por estar parcialmente saturados y puede cambiar su estabilidad volumétrica (Chávez et al., 2016), página 1.

4.4.2 Resultados de estabilización de la subrasante

Los pesos específicos de las mezclas disminuyen a medida que se incrementa el porcentaje de lodo aceitoso, esto dado que el peso específico del lodo aceitoso es inferior al peso específico de la subrasante.

El índice de plasticidad disminuye a medida que se adiciona lodo al material de subrasante hasta un 6%, con el 8% de lodo el efecto es nulo y el material presenta la misma plasticidad que el material no tratado. La adición de lodo a la subrasante no afecta en gran medida la humedad óptima y la densidad seca máxima.

La ascensión capilar en las probetas estabilizadas fue nula, caso contrario ocurrió en las probetas de subrasante original. El lodo aceitoso mejora la impermeabilidad de la subrasante retrasando la ascensión del agua hacia el interior de la probeta, reduce la pérdida de material que le genera el agua y la disminución de la resistencia.

En el ensayo de estabilidad hídrica se encontró que luego de 5 minutos de inmersión no ocurrió cambio alguno en las probetas; después de 20 días de inmersión, en las briquetas con 2 y 4% de lodo, se observó cierto grado de saturación sin colapsó ni desprendimiento de material, mientras que en las briquetas con 6 y 8% de lodo no se presentó cambio alguno.

En el estudio de la subrasante para pavimentos es muy importante su capacidad de soporte, para ello es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen, una vez que cambios de volumen conllevan a daños en las estructuras que se apoyen sobre este. Por esta razón, cuando se construye un pavimento sobre este tipo de suelos deberá tomarse la precaución de impedir las variaciones de humedad del suelo para la cual habrá que pensar en la impermeabilización de la estructura (Hernández, et al., 2016), página 8, aspectos que se logran mediante la adición de lodo aceitoso a la subrasante en porcentaje del orden del 6% en peso.



4.4.3 Análisis de lixiviados en las mezclas

Se realizó con el fin de evaluar la problemática ambiental que puede generar el uso de las mezclas estabilizadas con lodo aceitoso, al estar expuestas a las lluvias y su escorrentía. Las características de los lixiviados son muy variables y dependen de la interacción de muchos factores, como la composición y edad de los residuos, la disponibilidad de oxígeno y la humedad, la tasa de precipitaciones, la hidrología del lugar, la compactación, los procedimientos de muestreo y la interacción entre los lixiviados y el medio ambiente (Arrechea et al., 2015), página 7.

Las probetas de las mezclas estabilizadas se sometieron a saturación durante 15 días, luego se realizó el muestreo del agua para el análisis mediante fluorescencia de rayos X, los resultados se muestran en la (Tabla 2).

Tabla 2. Componentes del agua antes y después de inmersión durante 15 días

Componente	Al	Si	P	S	V	Fe	Ni	Cu
Componentes de la muestra de agua antes de inmersión de probetas								
Contenido	3	0	2	91.3	1	0.9	0.8	0
Unidad (%)	%	%	%	%	%	%	%	%
Componentes de la muestra de agua después de inmersión de probetas material granular – lodo								
Contenido	2	0.6	2	91.9	1	0.9	0.7	0.3
Unidad (%)	%	%	%	%	%	%	%	%
Componentes de la muestra de agua después de inmersión de probetas subrasante – lodo								
Contenido	3	0.6	2	91.2	1	1	0.9	0
Unidad (%)	%	%	%	%	%	%	%	%

Fuente: Los Autores

Para la mezcla lodo – material granular, se encontró que quedan trazas en el agua de elementos como silicio (Si), azufre (S) y cobre (Cu); mientras que para las mezclas subrasante – lodo se incrementa el contenido de silicio (Si), hierro (Fe) y níquel (Ni), aunque en muy bajas proporciones.

4.4.4 Caracterización dinámica

Las metodologías actuales para diseño de pavimentos consideran como propiedad fundamental, para caracterizar los materiales el módulo de resiliencia, estos se emplean tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico. (Corona, 2017), página 67.

El ensayo triaxial es uno de los más empleados para determinar los módulos resilientes de los materiales granulares y suelos de subrasante, el ensayo simula las condiciones más reales de los estados de esfuerzos a los cuales están sometidos los materiales en las capas de las estructuras de pavimentos flexibles al estar expuesto a las cargas móviles en la vida de servicio de los materiales. “El comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial fue estudiado mediante ensayos de corte directo consolidado drenado y ensayos triaxiales a compresión a gran escala” (Nanclares, 2018), página 7.

Para la determinación de los módulos resilientes, se elaboraron probetas de cada material (subrasante y granular) con 0%, 2%, 4%, 6% y 8% de lodo aceitoso; se dejaron en una cámara de curado, tal como se muestra en la (Figura 12), el periodo de curado fue de 7, 20 y 26 días, el ensayo se realizó en el equipo servo neumático NAT, en la figura 13 se muestra el resultado obtenido para la subrasante.





Figura 12. Cámara para el curado de probetas. Fuente: Los Autores

Se halló los módulos resilientes para unas condiciones particulares de esfuerzos, para ello se planteó la estructura de pavimento tradicional que aparece en la (Figura 14).

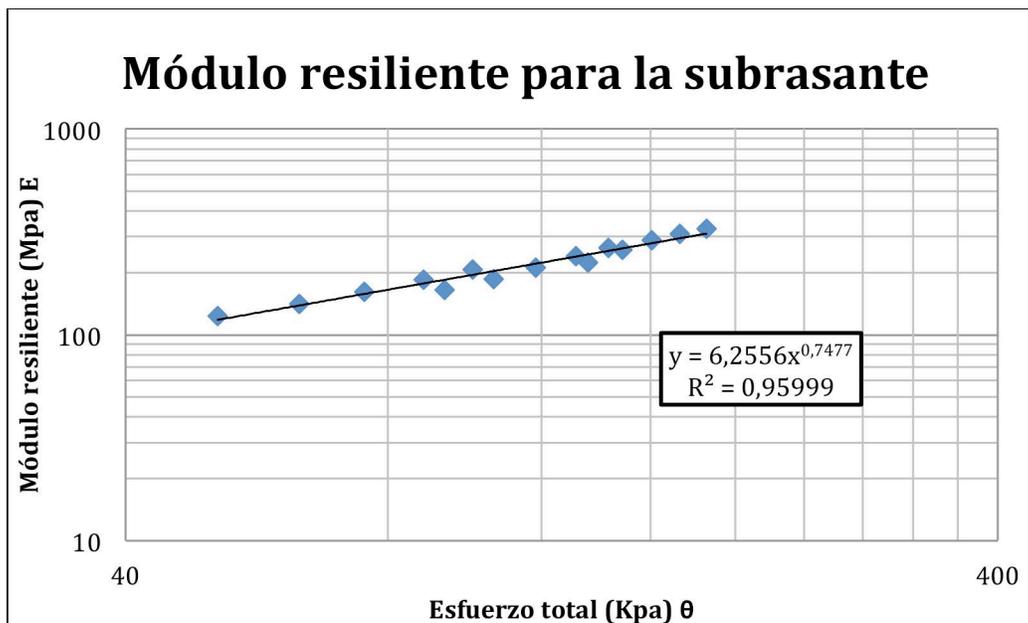


Figura 13. Módulo resiliente de la subrasante no tratada y 7 días de curado. Fuente: Los Autores



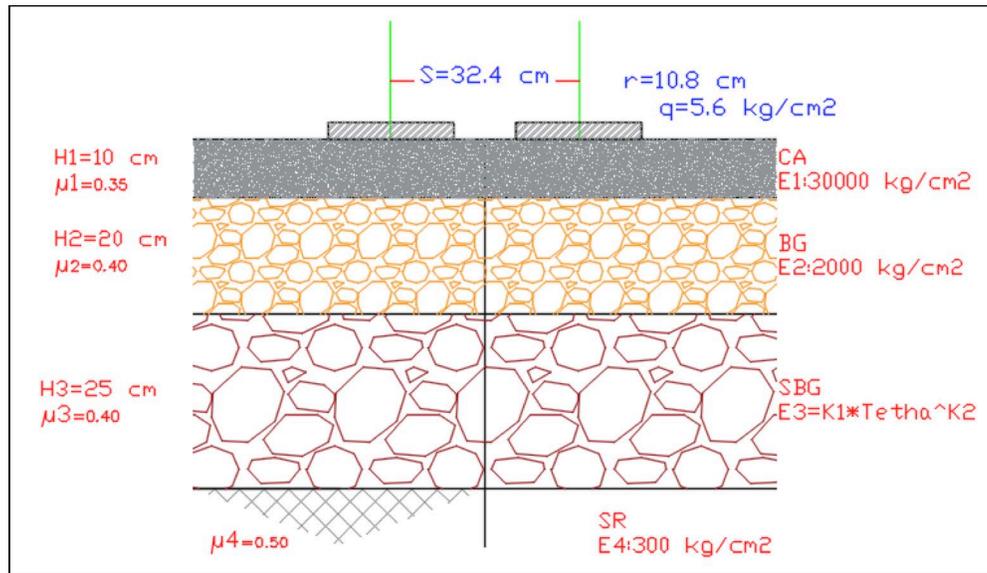


Figura 14. Modelo estructural de pavimento flexible. Fuente: Los Autores

Se tomó los valores de esfuerzos para la estructura de pavimento planteada, y teniendo en cuenta los modelos obtenidos del ensayo triaxial se determinó los módulos resilientes, los resultados se muestran en la (Figura 15) y (Figura 16).

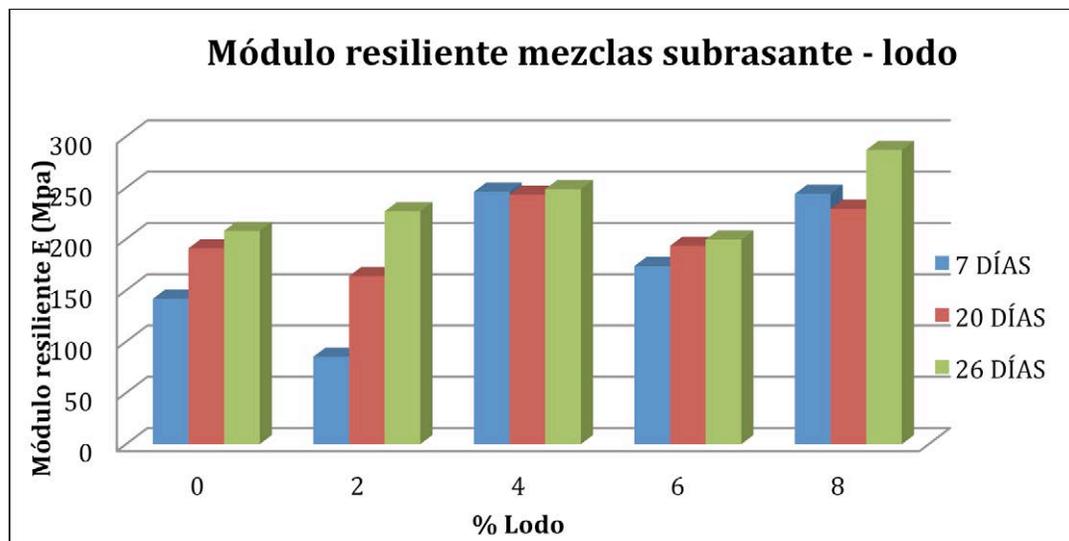


Figura 15. Módulos resilientes de las mezclas subrasante – lodo. Fuente: Los Autores

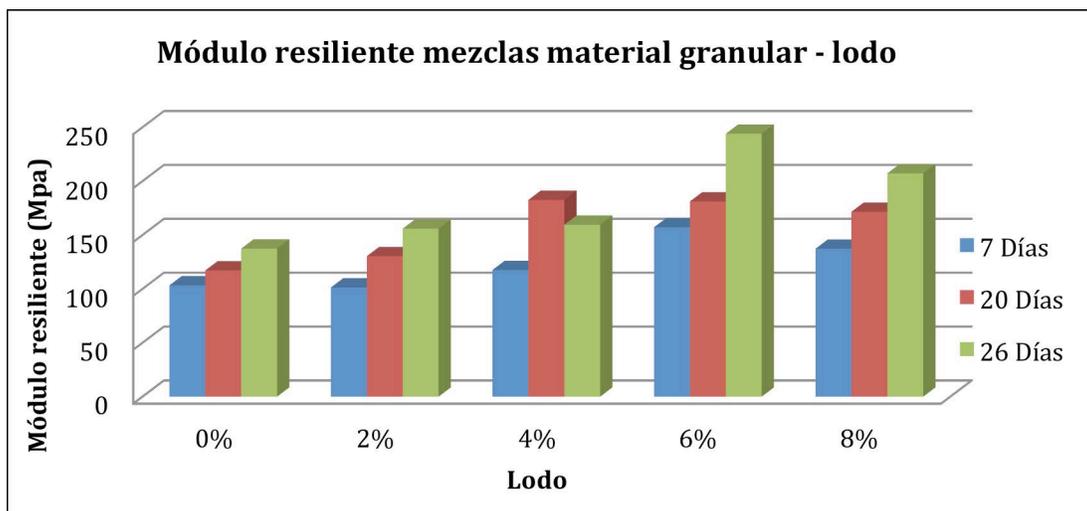


Figura 16. Módulo resiliente de las mezclas material granular – lodo. Fuente: Los Autores

El módulo resiliente de la subrasante presenta un comportamiento irregular respecto al porcentaje de lodo y periodo de curado. Los mejores resultados se obtienen con el 8% de lodo y curado 26 días, datos similares con el 4% de lodo para los diferentes periodos de curado. Para el material granular, los módulos más altos se obtienen con 6% de lodo y curado de 26 días. En ambos casos, la adición de lodo a los materiales originales, produce efecto positivo en su resistencia.

5. Análisis Económico

Para analiza la viabilidad económica de estabilizar subrasantes o material granular con la adición de lodo aceitoso, se determinó los costos del material original y estabilizado como parte integrante de una de las capas de una estructura de un pavimento flexible, la cual se planteó, inicialmente, con materiales convencionales para un determinado tránsito de diseño, la estructura resultante se muestra en la (Figura 17).

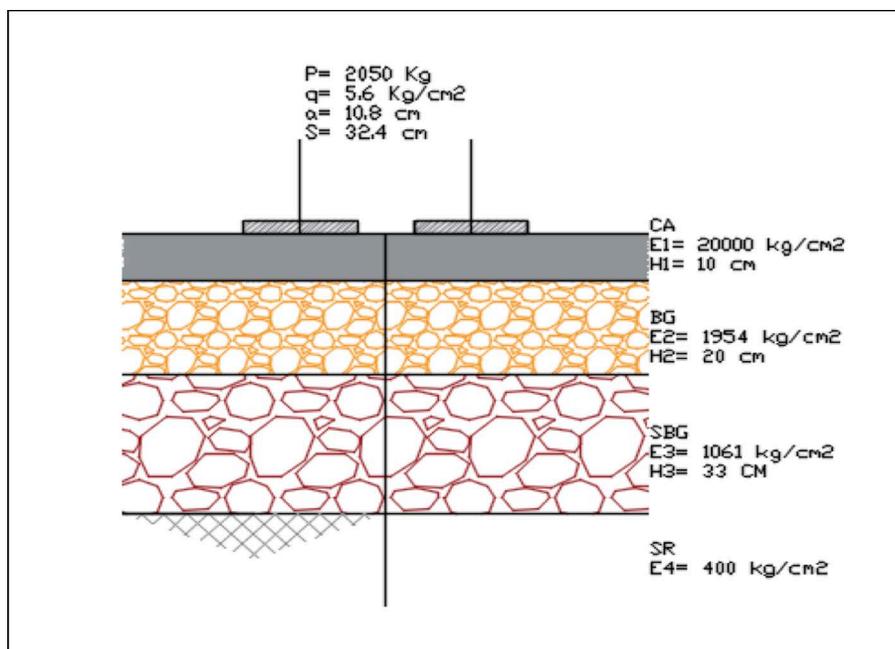


Figura 17. Estructura de pavimento con material granular convencional. Fuente. Los Autores



Igualmente se diseñó una estructura de pavimento flexible similar a la anterior, pero reemplazando la capa de subbase granular, por una capa del material granular estabilizado con el 6% de lodo aceitoso, se dimensionó esta estructura de tal manera que los valores de servicio fuesen similares a la estructura de pavimento inicialmente planteada, la nueva estructura se muestra en la (Figura 18).

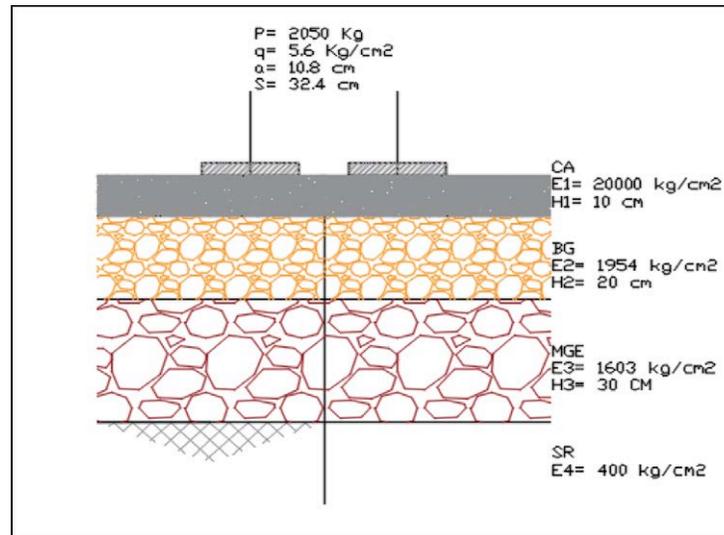


Figura 18. Estructura de pavimento con material granular estabilizado. Fuente. Los Autores

Como se advierte, la estructura de pavimento flexible utilizando el material granular estabilizado con el 6% de lodo aceitoso, disminuye su espesor en 5 cm respecto a la subbase granular de la estructura convencional.

Los valores de precios unitarios obtenidos son: \$90.046/m³ y \$79.170/m³ para material de subbase convencional y material granular estabilizado con el 6% de lodo aceitoso respectivamente.

Aunque no es un resultado absoluto, si se muestra la tendencia a disminuir los costos e invita a seguir investigando en el tema y obviamente, a implementar tramos de prueba que den mayores luces respecto a aspectos no tratados en el presente estudio, entre ellos el análisis del comportamiento de las dos capas en el tiempo.

6. Conclusiones

El porcentaje óptimo de lodo aceitoso recomendado para estabilizar el material granular, tipo afirmado, es 6%, con el cual se aumenta el módulo resiliente del orden del 40% con relación al módulo resiliente del material granular sin tratar, con un periodo de curado de 7 días.

Se recomienda el 4% de lodo aceitoso para tratar la subrasante, con el cual se logra un aumento de la resistencia del orden del 37% respecto a la subrasante natural.

Dados los resultados de los ensayos de CBR y módulo resiliente y teniendo en cuenta las condiciones bajo las cuales se ensayaron las probetas, se refleja la importancia del curado de las mezclas para que ganen resistencia con el tiempo.

El lodo aceitoso genera un efecto positivo en la subrasante, al hacerla menos susceptible a la acción del agua, más impermeable, incrementa su estabilidad hídrica al estar sometida a saturación, lo que garantiza la preservación de las propiedades de resistencia del material en las condiciones más críticas.

Es importante resaltar la reducción de la plasticidad alcanzada en la mezcla de material granular – lodo aceitoso, al pasar de 8% al 0%, es decir, con la adición del 6% de agente estabilizante, se produce una mezcla no plástica.

De acuerdo al análisis químico practicado al agua para revisar la acción de los lixiviados generados por las mezclas estabilizadas con lodo aceitoso, se encontró que la amenaza de contaminación de fuentes hídricas, en una posible implementación de la mezcla, es mínima; una vez que en los reportes del ensayo químico no se cuantificaron trazas de los componentes del lodo aceitoso.

Del análisis económico de la posible implementación del material granular estabilizado, como una capa de una estructura de pavimento flexible, se encuentra dos ventajas fundamentales; por un lado, se reducen los espesores de la estructura y por otro se disminuyen los costos constructivos por m³, esto teniendo en cuenta el reemplazo de la subbase granular convencional por una capa de material granular estabilizada con el 6% de lodo aceitoso.

Los resultados de la estabilización de material granular y subrasante con lodo aceitoso, a nivel de laboratorio, fueron satisfactorios para su uso en vías, sería conveniente construir tramos de prueba instrumentados para monitorear y verificar el comportamiento de las mezclas estabilizadas en servicio cuando hacen parte integrante de una estructura de pavimento.

7. Referencias

- Álvarez, M. (2015).** Estabilización química de suelos en proyectos de infraestructura vial en Antioquia. (tesis de maestría). Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Colombia.
- Arrechea, A.; López, M.; Espinosa, M. y Orestes, Ll. (2015).** Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 36 (2).
- Bada, D. (2016).** Aplicación del aditivo químico Conaid para atenuar la plasticidad del material granular del tramo de la carretera tauca – bambas (km73 + 514 – km132 + 537) de la ruta nacional pe – 3na. (tesis de maestría). Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.
- Caballero, O. (2017).** Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera – Bonanza – La Venturosa en el departamento del Vichada. (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Chavarro, W. y Molina, C. (2015).** Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito. (tesis de especialización). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Chávez, C.; Espinosa, J.; Alarcón, J. y Arreygue, J. (2016).** Colapso por humedecimiento en los terraplenes de la autopista Páztcuaro-Uruapan. Ingeniería Investigación y Tecnología, 17 (2), 201-210.
- Corona, C. (2017).** Determinación de módulo de rigidez y caracterización de módulo dinámico de mezcla Superpave. (tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Díez, L.; Montes, O. y Caicedo, B. (2015).** Estabilización de subrasantes con productos químicos. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/238782419_Estabilizacion_de_Subrasantes.
- Garzón, J.; Rodríguez, J. y Hernández, C. (2017).** Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. Universidad y Salud, 19(2), 309-318. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>.
- Hernández, J.; Mejía, D. y Zelaya, C. (2016).** Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la facultad multidisciplinaria oriental de la universidad de el salvador. (tesis de pregrado). Universidad de el Salvador, San Miguel, El Salvador.
- INVías. (2013).** Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá, Colombia.
- INVías. (2013).** Normas de ensayo de materiales para carreteras. Bogotá, Colombia.
- Méndez, R.; Gómez, P.; Ledesma, J. y Ceniceros, C. (2013).** Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco. Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2(4). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/337666457/manejo-integral-de-los-recortes-de-perforacion-docx>.
- Nanclares, F. (2018).** Comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial. (tesis de doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Olaya, A. (2018).** Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, Bucaramanga, Colombia.
- Peralta, A.; Blanco, J.; Reina, J. y Mantilla, L. (2017).** Transporte de crudo pesado por oleoducto usando el método de dilución: Un enfoque práctico para modelar la caída de presión y la precipitación de asfaltenos. Fuentes: El reventón energético, 15 (2), 7-17. doi: <https://doi.org/10.18273/revfue.v15n2-2017001>.
- Tecca. Compañía operadora del agua. (2014).** Planta mejoramiento de lodos. Proyecto tricanter generalidades. Bogotá.
- Ulate, A. (2017).** Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales. PITRA-LanammeUCR, 8(2).
- Vargas, Y. y León, N. (2016).** Exploración y explotación de petróleo: enfoque geográfico de los efectos ambientales en el piedemonte llanero. Perspectiva Geográfica, 21(2), 199-224. doi: <http://dx.doi.org/10.19053/01233769.5795>.

