

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

PROPUESTA: LM-PI-UMP-011-14

EVALUACIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS COMO
AGENTES ESTABILIZADORES DE MATERIALES
GRANULARES Y SUELOS EN SUBRASANTES PARA
SU UTILIZACIÓN COMO SUPERFICIES DE
RODAMIENTO EN CARRETERAS DE BAJO
VOLUMEN VEHICULAR

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Septiembre, 2014



Documento generado con base en el Art. 6, inciso i) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capit. 6, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

1. Propuesta LM-PI-UMP-011-14		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: EVALUACIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS COMO AGENTES ESTABILIZADORES DE MATERIALES GRANULARES Y SUELOS EN CAPAS DE SUBRASANTE PARA SU UTILIZACIÓN COMO SUPERFICIES DE RODAMIENTO EN CARRETERAS DE BAJO VOLUMEN VEHICULAR		4. Fecha de la Propuesta Septiembre, 2014
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <p><i>Existen diferentes métodos de estabilización según el aspecto que se desee mejorar. Los hay mecánicos como la compactación, y la estabilización físico-química, para la cual se usan técnicas como la estabilización con cemento, cal, aceites o agentes químicos.</i></p> <p><i>Entre las ventajas que se reconocen de utilizar aditivos para mejorar o estabilizar las propiedades de los materiales granulares y suelos, se menciona la reducción del impacto ambiental, al aprovechar el material existente en el lugar y evitando grandes acarreos de materiales de fuentes cercanas, por otro lado pueden reducirse los tiempos de ejecución y la cantidad de actividades de mantenimiento</i></p> <p><i>Con el presente estudio se busca evaluar el efecto de la aplicación de aditivos como agente estabilizador de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los materiales granulares y suelos que puedan ser utilizados como superficie de rodamiento en carreteras de bajo volumen vehicular.</i></p>		
10. Palabras clave Estabilización; Capacidad mecánica; Durabilidad; Aditivo	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 20
13. Preparado por: Ing. Fabiola Miranda Argüello Investigadora	Ing. Tania Ávila Esquivel Investigadora	Fecha: 30 / 09 / 14
14. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos	Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA Sub-Coordinador PITRA	15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, MSc Coordinador General PITRA
Fecha: 30 / 09 / 14	Fecha: 30 / 09 / 14	Fecha: 30 / 09 / 14

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	OBJETIVO GENERAL	4
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3	ANTECEDENTES	5
1.4	JUSTIFICACIÓN.....	5
1.5	MARCO TEÓRICO	6
2	METODOLOGÍA PROPUESTA	11
2.1	INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	16
3	CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN	18
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema experimental.....	12
------------------	---------------------------	-----------

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1.	Requisitos mínimos para estabilización de materiales y selección del aditivo.....	13
Cuadro 2.	Requisitos de resistencia mínimos requeridos para mezclas de estabilización ...	15
Cuadro 3.	Rangos de resistencia a la compresión	17
Cuadro 4.	Condiciones de resistencia de capas estabilizadas con cal para un tiempo de curado de 7 días.....	18
Cuadro 5.	Condiciones de plasticidad de capas estabilizadas con cal	18

1 INTRODUCCIÓN

La estabilización de un suelo consiste en la aplicación de un método mediante el cual se puedan alterar o mejorar sus propiedades físicas y mecánicas de manera que su comportamiento sea aceptable, bajo las condiciones en que va a ser utilizado.

Existen diferentes métodos de estabilización según el aspecto que se desee mejorar, ya sea mecánicos como la compactación, o la estabilización físico-química, para la cual se usan técnicas como la estabilización con cemento, cal, aceites o agentes químicos.

Entre las ventajas que se reconocen de utilizar aditivos para mejorar o estabilizar las propiedades de los materiales granulares y suelos, se menciona la reducción del impacto ambiental, al aprovechar el material existente en el lugar, evitando grandes acarrees de materiales. Además pueden reducirse los tiempos de ejecución y la cantidad de actividades de mantenimiento.

La presente propuesta busca ofrecer una guía para una evaluación primaria del efecto de los aditivos modificadores en las propiedades físicas y mecánicas de materiales granulares y suelos, con el fin de evaluar diferentes aditivos con potencial para la estabilización de subrasantes para ser utilizadas como superficies de rodamiento en carreteras de bajo volumen de tránsito.

1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de aditivos como agentes estabilizadores en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales granulares y suelos en capas de subrasante para ser utilizados como superficie de rodamiento en carreteras de bajo volumen de tránsito.

1.2 Objetivos específicos

- Verificar el cumplimiento de las propiedades del material existente para la aplicación de técnicas y métodos de estabilización con diferentes aditivos.
- Evaluar las variaciones en laboratorio del comportamiento y propiedades físico-mecánicas de materiales estabilizados con diferentes aditivos.

- Evaluar el efecto de la modificación de los materiales con aditivos mediante la ejecución de los ensayos de laboratorio sugeridos en la especificación de Estabilización de Subrasantes del LanammeUCR.
- Brindar recomendaciones para la aplicación del aditivo como método de estabilización y mejoramiento de las propiedades del material.

1.3 Antecedentes

La estabilización de suelos se ha probado con numerosos agentes químicos y ha sido estudiada principalmente por los constructores de carreteras. En la estabilización química se alteran las propiedades del suelo, cambiando la estructura molecular de la superficie de los granos. La principal ventaja de esta técnica radica en que permite aprovechar los materiales de menor calidad propios de ciertas zonas, además no requiere de extracción ni acarreo de material como ocurre en el proceso de sustitución.

Los aditivos utilizados pueden ser de naturaleza inorgánica y orgánica, cumplen con la función de producir nuevos compuestos de naturaleza cementante y que le permitan actuar como agentes impermeabilizantes.

Actualmente en el país la práctica de estabilización de materiales granulares y suelos para la utilización de estos como superficies de rodamiento ha sido poco implementada. Se tienen registros de dos proyectos de investigación, en los cuales se construyó un tramo experimental y se les dio seguimiento para verificar el desempeño del material en el tiempo. Estos proyectos se ubican en Cartago y Guanacaste, en ambos se obtuvieron resultados positivos, no obstante la falta de mantenimiento evidencian una degradación mayor a la esperada. Dentro de las propiedades que se monitorearon en los tramos de prueba se mencionan parámetros de resistencia mediante ensayos de resistencia a la compresión confinada, CBR y cono de penetración dinámico, así como la evaluación de propiedades físicas como límites de consistencia.

1.4 Justificación

A lo largo del territorio nacional es común encontrar la presencia de suelos problemáticos que dificulten la construcción de algún proyecto de infraestructura vial o que lleguen a ser el principal motivo para que se traslade el proyecto de lugar o que inclusive el proyecto sea descartado del todo.

Propuesta LM-PI-UI-XXX	Fecha de emisión: 20 de agosto 2013	Página 5 de 20
------------------------	-------------------------------------	----------------

Es acá donde el mejoramiento de los suelos utilizando aditivos químicos ofrece una opción económica y constructivamente factible para poder habilitar terrenos con características inadecuadas para el desarrollo de infraestructura vial, y de esta manera permitir optimizar el uso de materiales y minimizar los problemas o accidentes y las pérdidas económicas que estos producen.

Los objetivos de utilizar técnicas y procedimientos que permitan mejorar el suelos son básicamente obtener un aumento en la resistencia, reducir la distorsión bajo esfuerzos aplicados, reducir la compresibilidad, controlar la contracción y la expansión, entre otros.

Sin embargo en el país no existe un documento donde se evalúen los aspectos anteriores, esta guía procura medir el desempeño de un aditivo al utilizarse para estabilizar un suelo. Lo que se pretende es plantear una metodología que se utilice para verificar que el aditivo cumpla los requisitos mínimos establecidos en la especificación. Con el sistema establecido en este documento, por primera vez se puede determinar de manera fidedigna la eficacia de cualquier aditivo y a la vez determinar la calidad del mismo.

1.5 Marco teórico

El término estabilización se refiere a la modificación de alguna de las propiedades del terreno para mejorar su comportamiento ingenieril. La estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos, desde luego se deberá entender el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que mejorará y el esfuerzo para lograrlo.

La función de un agente estabilizador, es unir las partículas de arcilla entre sí, de modo que el tamaño aparente aumente. Para poder cumplir con este propósito el agente debe tener las siguientes características:

- Tener una carga eléctrica opuesta a la superficie de las láminas para unirse a éstas. Las partículas de suelo que tienen carga según su pH.
- Debe ser polivalente para enlazar a distintas partículas a los paquetes su lámina.
- La sustancia que contenga el agente debe ser bastante soluble en agua, por ser este medio en que ocurren las reacciones químicas en el suelo. Además porque el agua es el vehículo con el que se introducirá el reactivo a la matriz del suelo.

- Los polivalentes son electroquímicamente más activos que los cationes monovalentes presentes en el suelo, de modo que los desplazan y ocupan sus lugares, evitando que éstos dispersen las partículas.
- La permanencia de cationes debe ser estable en el suelo, para evitar la lixiviación o lavado de éstos y entre más alta sea la valencia del catión mayor será su capacidad de ser retenidos en el suelo.
- La sustancia que contenga el agente estabilizador debe ser fácil de transportar, fácil de aplicar, segura de manejar, el porcentaje de agente en la sustancia debe ser lo más elevado posible y que el precio sea razonable. Hay que analizar todos estos factores en las distintas opciones y decidirse por la más conveniente.

Para poder realizar un proceso comparativo entre las propiedades del suelo en estado natural y del suelo después de ser estabilizado con algún aditivo, se pueden realizar una caracterización de ambos a partir de los siguientes ensayos:

- **IT-GC-01 Granulometría de suelos, mediante mallas e hidrómetro:** Tiene por objeto determinar de forma cuantitativa los tamaños de las partículas del material. Mediante este ensayo se determina la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca. En el caso de las partículas con un tamaño superior a 0.075mm (Malla No. 200 ASTM) se emplea la separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura. En el caso de partículas con tamaño inferior a 0.075mm (Malla No. 200 ASTM) se emplea la separación por sedimentación y medición con hidrómetro.
- **IT-GC-05 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad:** Tiene por objeto determinar la plasticidad del material. La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Los límites de consistencia o límites de Atterberg, se determinan empleando material que pase la malla No. 40.
- **ASTM D1633 Resistencia a la compresión inconfiada de materiales estabilizados:** Tiene por objeto determinar la resistencia al corte del espécimen basado en los resultados de la prueba de compresión simple o prueba de compresión

axial no confinada. Se analizará el comportamiento del material en una condición seca (espécimen mezclado y compactado con el contenido de humedad óptimo determinado del procedimiento IT-GC-06), y bajo una condición saturada (los especímenes son sometido por 24 horas a un remojo por capilaridad: el espécimen debe de cubrirse en una tela absorbente y deben de colocarse sobre una piedra porosa. El nivel del agua debe alcanzar la parte superior de la piedra y estar en contacto con la tela para lograr la absorción por capilaridad, pero el espécimen no debe de estar en contacto directo con el agua).

- **IT-GC-06 Compactación de suelo (Próctor estándar / modificado):** Tiene por objeto observar la relación que existe entre el grado de humedad y el peso volumétrico máximo para ese material y esa energía de compactación, con la finalidad de valorar el aumento en la resistencia y reducción de la compresibilidad. La prueba consiste en la determinación del peso por unidad de volumen de un material que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.
- **IT-GC-08 Índice de soporte de California (CBR):** El CBR es un índice de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo en condiciones determinadas de compactación y humedad, sujeto a un determinado periodo de saturación. Se expresa como el tanto por ciento de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo, respecto a la necesaria para que el mismo pistón penetre la misma profundidad en una muestra patrón definida por el ensayo.
- **AASHTO T 307 Método de ensayo estándar para determinar el módulo resiliente de suelos y materiales granulares:** El ensayo consiste una prueba triaxial, en donde se aplica una presión de confinamiento al espécimen, a la vez que se aplica un esfuerzo desviador en forma repetida. Los resultados obtenidos indican propiedades básicas del material que pueden ser utilizadas en el análisis mecánico de sistema de multicapas en estructuras de pavimentos.
- **ASTM D559-96 Humedecido y secado de mezclas compactadas de suelo-aditivo:** Estos métodos de ensayo cubre los procedimientos para la determinación de las pérdidas de suelo estabilizado debido a cambios en el contenido de agua y los cambios de volumen (hinchamiento y contracción) producidos por humedecimiento y

secado repetidos de los especímenes. Al final se calcula el porcentaje de pérdida de masa después del tratamiento. Se pretende aplicar al menos 3 ciclos de los 12 ciclos que comprende el procedimiento estándar ASTM.

- **Análisis termo gravimétrico (TGA):** Es una técnica analítica utilizada para determinar la estabilidad térmica de un material, su fracción de componentes volátiles, el comportamiento de la deserción de moléculas líquidas o gaseosas en un material sólido para estimar la energía de activación de la deserción (descomposición) vía reacciones químicas durante el proceso de calentamiento en una atmósfera controlada hasta altas temperaturas (típicamente hasta 1000°C). El análisis, que involucra equipos con un alto grado de precisión, consiste en la medición del cambio en peso de un material en función de la temperatura cuando éste es calentado. El calentamiento se puede realizar a temperatura constante, lineal o variable.
- **Difracción con rayos X:** El ensayo tiene como objetivo encontrar datos tanto cualitativos como cuantitativos sobre la composición mineralógica de rocas y materias primas. Los rayos X interactúan con los electrones que rodean los átomos que tengan una longitud de onda del mismo orden de magnitud que el radio atómico. El haz de rayos X emergente tras esta interacción contiene información sobre la posición y tipo de átomos encontrados en su camino. En un cristal, donde la disposición de los átomos o moléculas se repite periódicamente, los haces de rayos X dispersados elásticamente por los átomos en ciertas direcciones resultan amplificados gracias al fenómeno de interferencia constructiva, dando lugar a un patrón de difracción. Los rayos X difractados son interceptados por detectores y su intensidad y posición analizadas por medios matemáticos para obtener una representación de las moléculas del material estudiado a escala atómica.
- **Prueba de pH del suelo:** El objetivo del ensayo es determinar si el suelo tiene una reacción ácida, alcalina o neutra. La medición se puede realizar mediante un pHmetro que por medio de un electrodo de vidrio sensible al ion hidronio, que se introduce en una solución preparada con una parte de mezcla de suelo y dos partes de agua destilada se obtiene una lectura directa del pH. Otra forma de obtener es mediante papel tornasol y los indicadores cromáticos.

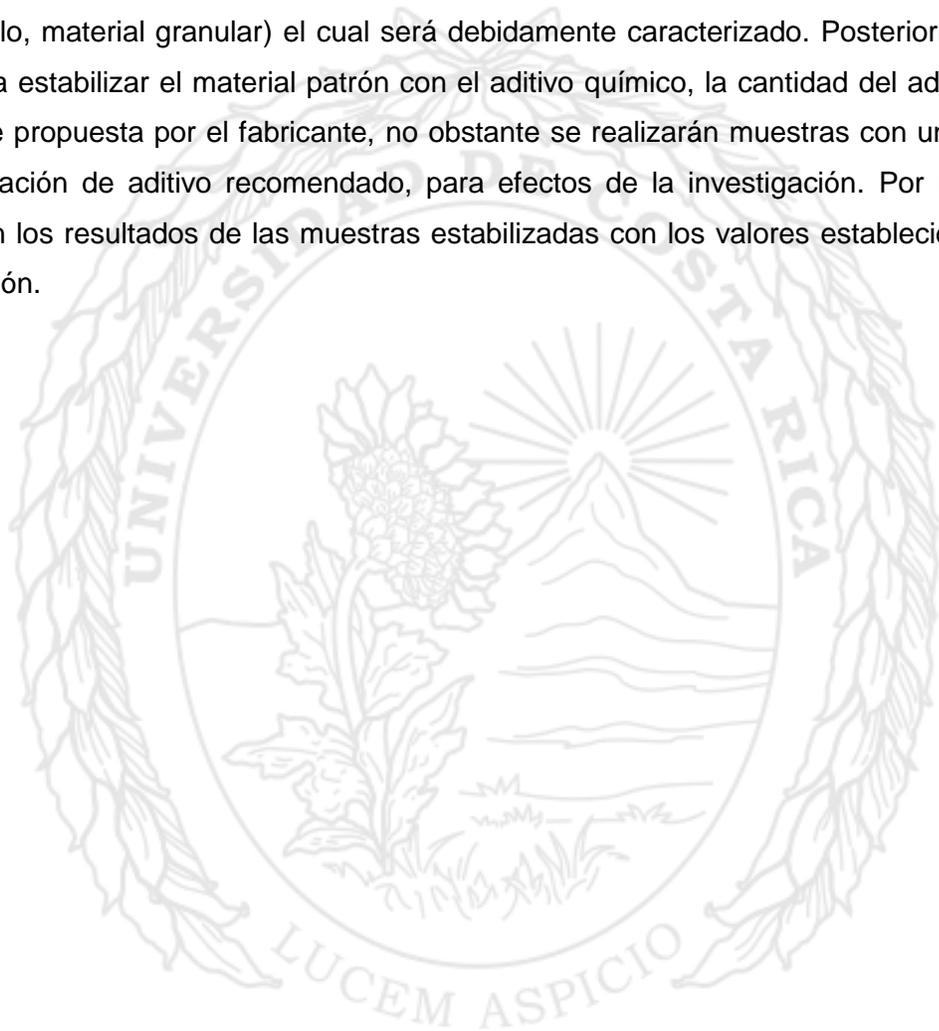
- **Calorimetría de barrido diferencial (DSC):** Es una técnica termoanalítica que permite el estudio de aquellos procesos que producen variación entálpica, para así determinar propiedades características de la muestra como el calor específico, punto de ebullición, punto de fusión, pureza de compuestos cristalinos, entalpías de reacción, entre otros. Generalmente, el programa de temperatura para un análisis DSC es diseñado de tal modo que la temperatura del portador de muestra aumenta linealmente como función del tiempo. Determinando la diferencia de flujo calorífico entre la muestra y la referencia, los calorímetros DSC son capaces de medir la cantidad de calor absorbido o eliminado durante tales transiciones. La DSC puede ser utilizada también para determinar cambios de fase más sutiles tales como las transiciones vítreas. El resultado de un experimento DSC es una curva de flujo calorífico versus temperatura o versus tiempo.
- **Espectroscopia de fuerza atómica Raman:** Es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona información física, química y estructural de casi cualquier material o compuesto orgánico y/o inorgánico permitiendo así su identificación en pocos segundos. Tiene como ventaja que no requiere ningún tipo de preparación y no conlleva ninguna alteración de la superficie sobre la cual se realiza el análisis.
- **ASTM C837-09 Método de ensayo estándar para la determinación del Índice de Azul de Metileno de arcillas:** Este método de ensayo permite determinar la cantidad de adsorción del colorante de azul de metileno por una arcilla, que se calcula como el índice de azul de metileno de la arcilla, parámetro relacionado con la capacidad de intercambio catiónico.

Es importante destacar el hecho de que para seleccionar el método o la técnica apropiada de mejoramiento se deben de tomar en cuenta factores como el tipo y grado de mejora que sea requerido. También es importante conocer el tipo de suelo, estructura geológica y condiciones de flujo. Por otro lado el costo del proyecto que se planea realizar, la disponibilidad de equipos y materiales, el tiempo de construcción disponible y la posibilidad de daños a estructuras adyacentes son aspectos necesarios a considerar

2 METODOLOGÍA PROPUESTA

Esta investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de un aditivo como estabilizador en las propiedades mecánicas, tales como el desempeño y la resistencia de materiales granulares o de suelos.

El proyecto se divide en fases bien definidas, con alcances específicos para el cumplimiento del objetivo final (**Figura 1**). En términos generales, se plantea la definición de un material patrón (suelo, material granular) el cual será debidamente caracterizado. Posteriormente se procederá a estabilizar el material patrón con el aditivo químico, la cantidad del aditivo será inicialmente propuesta por el fabricante, no obstante se realizarán muestras con un $\pm 2\%$ de la concentración de aditivo recomendado, para efectos de la investigación. Por último se compararán los resultados de las muestras estabilizadas con los valores establecidos en la especificación.



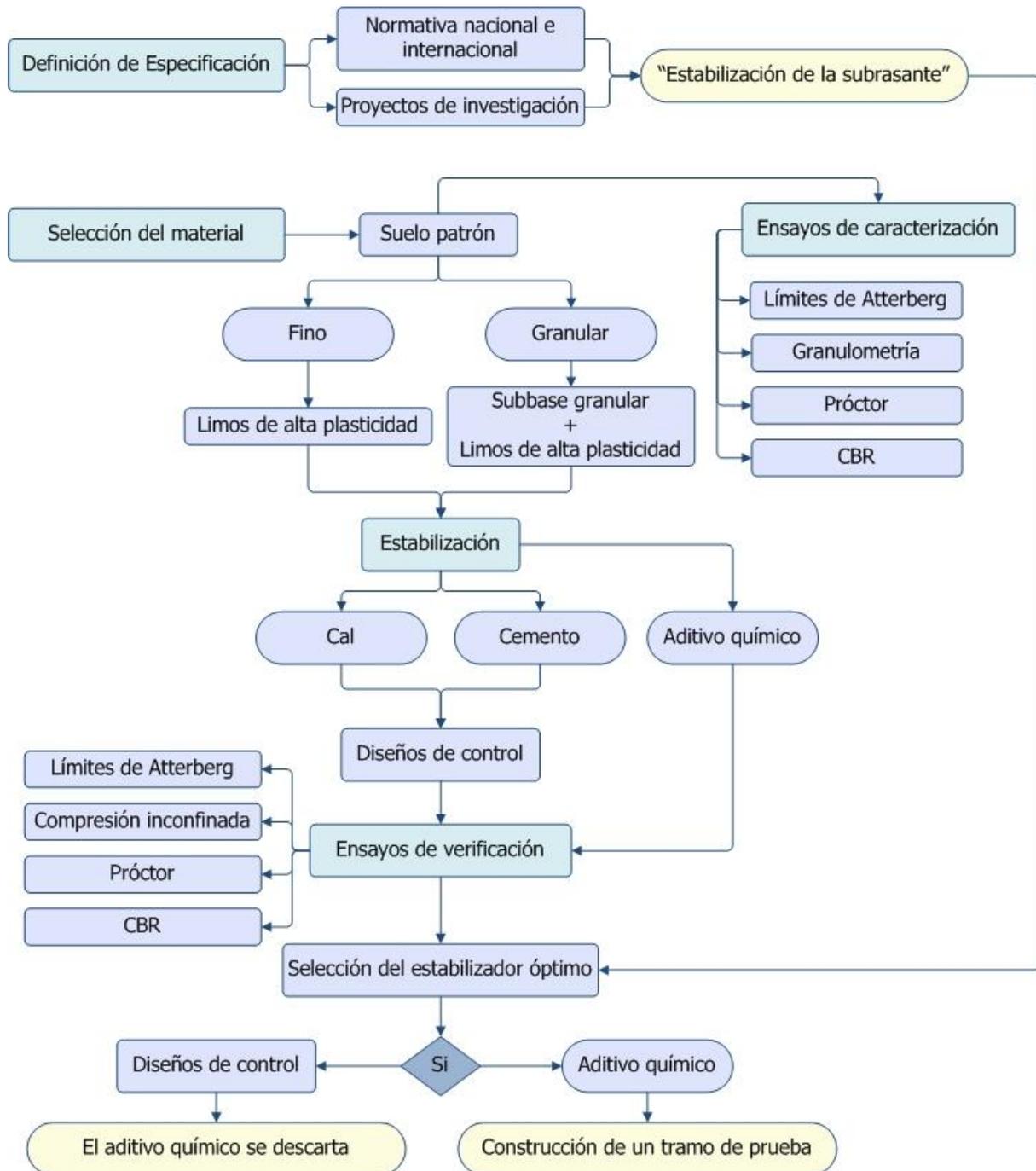


Figura 1. Esquema experimental

El esquema experimental planteado tiene como objetivo principal el crear un primer filtro para determinar la eficacia de un aditivo químico como agente estabilizador de subrasantes. En la figura se pueden observar los principales procesos que se van a llevar a cabo, sin embargo es de suma importancia explicar de manera detallada dicho esquema.

Primeramente se realiza una caracterización general a dos muestras de material en su estado natural, esto con el fin de poder determinar el efecto que tuvo el proceso de estabilización sobre sus propiedades físicas y mecánicas. En este primer paso se va a llevar a cabo la caracterización de un suelo fino limoso de alta plasticidad, y a un suelo granular contaminado con limos de alta plasticidad. Para este proceso de caracterización, a ambas muestras se le van a aplicar los siguientes ensayos:

- Granulometría de suelos, mediante mallas e hidrómetro (IT-GC-01).
- Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad (IT-GC-05).
- Compactación de suelo (Próctor estándar / modificado (IT-GC-06).
- Índice de soporte de California CBR (IT-GC-08).

Una vez terminado el proceso de caracterización, se prosigue con la estabilización de dichos materiales utilizando cal, cemento y el aditivo químico. En la especificación “Estabilización de Subrasantes”, en la Tabla 213-01, donde se presentan recomendaciones del agente estabilizador que se debe utilizar con base en las características del tipo de material que va a ser estabilizado, esta información aparece en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Requisitos mínimos para estabilización de materiales y selección del aditivo

Aditivo Estabilizador	Tipo de suelo	IP	% material pasando la Malla # 200	LL
Cal	Granular ⁽¹⁾	12 mín	12 mín	-
	Fino ⁽²⁾	12 mín	-	
Cemento	Granular ⁽¹⁾	12 máx	12 máx	40 máx
	Fino ⁽²⁾	12 máx	-	
Aditivos químicos	Todos	Definido por el fabricante		-

(1) El material granular es aquel que tiene 50% o menos de la muestra pasando la malla #200.

(2) El material fino es aquel que tiene más del 50% de la muestra pasando la malla #200.

A pesar que en el **Cuadro 1** se especifican umbrales para la utilización ya sea de cal o cemento respecto al suelo que se estudia, se realizarán diseños tanto de suelos fino como en suelos granulares utilizando cal y cemento como agentes estabilizadores, esto con la intención de contar con diseños de control contra los cuales sea posible comparar los resultados obtenidos al utilizar un aditivo químico como agente estabilizador.

Para este punto deben haber 6 muestras de material estabilizado:

- Material fino estabilizado con cal.
- Material fino estabilizado con cemento.
- Material fino estabilizado con el aditivo químico.
- Material granular estabilizado con cal.
- Material granular estabilizado con cemento.
- Material granular estabilizado con el aditivo químico.

Seguidamente se continúa con la etapa donde se realizan los ensayos de verificación, por lo tanto a las 6 muestras se le aplican los siguientes ensayos:

- Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad (IT-GC-05)
- Resistencia a la Compresión Inconfinada (ASTM D1633)
- Compactación de suelo (Próctor estándar / modificado) (IT-GC-06)
- Índice de soporte de California, CBR (IT-GC-08)

Con los resultados obtenidos de dichos ensayos y los resultados obtenidos en el proceso de caracterización de los materiales, se puede verificar el efecto que los agentes estabilizadores tuvieron sobre las propiedades físicas y mecánicas de las muestras. Dichos resultados son comparados con lo que se establece en la especificación, para determinar si las muestras cumplen con los requisitos mínimos establecidos, como es el caso de la resistencia a la compresión mínima que se recomienda para mezclas estabilizadas, dichas recomendaciones se presentan en el **Cuadro 2**, tomado de la Tabla 213-02 de la especificación de Estabilización de Subrasantes.

Cuadro 2. Requisitos de resistencia mínimos requeridos para mezclas de estabilización

Aditivo Estabilizador	Procedimiento	Resistencia a la Compresión (Mín.)	CBR (Mín.)
Cal	ASTM D 5102 (B)	0.30 MPa ⁽¹⁾	15
Cemento	ASTM D 1633	1 MPa ⁽²⁾	
Aditivos químicos	Recomendado por el fabricante	0.30 MPa (para materiales con un 12 % mínimo pasando la malla # 200) ⁽³⁾	
		1 MPa (para materiales con un 12 % máximo pasando la malla # 200) ⁽³⁾	

(1) Previamente a la falla cure los especímenes por 7 días a 40°C dentro de una bolsa impermeable, seguidamente someta los especímenes por 24 h a un remojo por capilaridad (cubrir el espécimen con una tela absorbente y colocar sobre una piedra porosa u oasis. El nivel del agua debe alcanzar la parte superior de la piedra porosa y estar en contacto con la tela para lograr la absorción por capilaridad, pero el espécimen de suelo no debe de estar en contacto directo con el agua), de acuerdo al método de la Asociación Americana de la Cal (NLA, por sus siglas en inglés).

(2) 7 días de curado en cuarto húmedo seguidos por saturación por inmersión durante 4 horas.

(3) Seguir las recomendaciones del fabricante

Es importante destacar que si alguna de las muestras estabilizadas no cumple con los requisitos mínimos establecidos en la especificación, automáticamente queda eliminada, es decir, en este punto se puede llegar a la conclusión de descartar el aditivo químico como agente estabilizante para suelos con características semejantes a los estabilizados a lo largo de este proceso.

En el caso de que todas las muestras cumplen con los requisitos establecidos en las normativas, se entra en un proceso comparativo para poder seleccionar de manera correcta el estabilizador óptimo para cada uno de los materiales que fueron estabilizados. Para cada uno de los materiales se pueden presentar los siguientes escenarios.

- **Escenario 1:** la muestra estabilizada con cal o la estabilizada con cemento, presenta mejores características físicas y mecánicas en comparación con la muestra estabilizada con el aditivo químico, en este caso automáticamente se descarta el uso del aditivo químico como agente estabilizador y se escoge a la cal o al cemento como agente estabilizador óptimo.

- **Escenario 2:** la muestra estabilizada con el aditivo químico presenta características semejantes a las muestras estabilizadas con cal y cemento. En este caso se puede llegar a verificar la efectividad del aditivo químico con agente estabilizador, sin embargo no sería seleccionado como el estabilizador óptimo ya que usualmente sería la cal o el cemento la opción más viable de implementar desde un punto de vista económico.
- **Escenario 3:** la muestra estabilizada con el aditivo químico presenta mejores características físicas y mecánicas en comparación con las muestras estabilizadas con cal o cemento, en esta caso automáticamente se elige el aditivo químico como el agente estabilizador óptimo.

En el caso de que se presente el escenario 3, se procede a planear la construcción de un tramo de prueba para estudiar el desempeño a largo plazo del material estabilizado con el aditivo químico, es importante recalcar el hecho de que el tramo de prueba debe estar ubicado en un lugar donde el material del sitio sea semejante a los materiales estabilizados a lo largo de este proceso, de tal manera que los resultados obtenidos sean válidos y puedan ser comparados con los resultados obtenidos con el plan propuesto en este documento.

2.1 Investigación bibliográfica

Para poder determinar los requisitos mínimos que fueron establecidos en la especificación, se realizó una consulta a diferentes informes técnicos donde se analizan los cambios en las diferentes propiedades físicas y mecánicas de un suelo debido a la mezcla de dicho suelo con algún agente estabilizante.

Dos de los informes técnicos consultados para la formulación de la especificación fueron realizados en conjunto por la Universidad de Kansas y el Departamento de Transportes de Kansas, donde se evaluaron los efectos de algunos agentes estabilizantes tales como cemento, cal, polvo de horno de cemento y ceniza en 8 diferentes tipos de suelo. Dichos informes son *Performance of Soil Stabilization Agents* y *Use of Cement Kiln Dust for Subgrade Stabilization*. En estas investigaciones se determinó que todos los aditivos tuvieron un efecto positivo, disminuyendo de manera considerable el índice de plasticidad. Al mismo tiempo se demostró que la cal fue el aditivo que tuvo el mejor resultado llevando a todas las muestras a un estado no plástico al añadir suficiente cantidad de esta. Por otro lado el

cemento y la ceniza a pesar de que tuvieron buenos resultados, las muestras retuvieron cierto grado de plasticidad. Es importante destacar que todos los aditivos causaron que el índice de plasticidad se redujera en más de un 50%.

Con respecto a la resistencia a la presión confinada, todos los aditivos tuvieron un impacto positivo aumentando dicho parámetro de manera importante. El cemento fue el aditivo que causó el mayor aumento en la resistencia a la presión confinada de las muestras. A pesar de no obtenerse resultados tan altos, los resultados obtenidos con los demás agentes estabilizantes fueron aceptables, teniendo como promedio un aumento de cinco veces la resistencia inicial del suelo en su estado natural.

Por otro lado, en la Universidad de Malasia, se estudió el efecto del cemento, cal y diferentes tipos de ceniza en la estabilización de diferentes tipos de suelos, que generalmente contenían altos porcentajes de arcillas con gran plasticidad. De manera general los resultados obtenidos fueron semejantes para todos los aditivos, se pudo determinar que al agregar diversos agentes estabilizantes el contenido óptimo de agua aumentaba y la densidad asociada a esa cantidad de agua disminuía respecto al suelo en su estado natural. Por otro lado también se pudo apreciar un aumento del CBR al adicionar aditivos, de los que la ceniza fue el aditivo que aumentó en mayor magnitud el valor de CBR.

Por otro lado también se revisaron especificaciones de otras instituciones, donde se realizan sugerencias de las características que deben tener los materiales granulares y suelos estabilizados con agentes químicos. Por ejemplo la *National Cooperative Highway Research Program* posee un documento titulado *Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials*, donde se establece la resistencia a la compresión mínima para materiales estabilizados con cemento, estos valores se muestran en el **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Rangos de resistencia a la compresión

Tipo de suelo	Clasificación AASHTO	Resistencia a la Compresión (espécimen saturado) (psi)	
		7 días	28 días
Arenas y Gravas	A-1, A-2, A-3	300-600	400-1000
Limos	A-4, A-5	250-500	300-900
Arcillas	A-6, A-7	200-400	250-600

Propuesta LM-PI-UI-XXX	Fecha de emisión: 20 de agosto 2013	Página 17 de 20
------------------------	-------------------------------------	-----------------

Fuente: NCHRP, 2009.

Otra de las especificaciones consultada fue la utilizada actualmente por la Alcaldía Mayor de Bogotá, donde se estipulan algunas recomendaciones para la resistencia y plasticidad de capas estabilizadas con cal. Estos valores se muestran en el **Cuadro 4** y el **Cuadro 5**

Cuadro 4. Condiciones de resistencia de capas estabilizadas con cal para un tiempo de curado de 7 días

Capa	Ensayo	Valor Recomendado
Bases y subbases granulares	Resistencia a la compresión inconfiada	≥ 690 KPa
Subrasantes	Resistencia a la compresión inconfiada	≥ 345 KPa

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá.

Cuadro 5. Condiciones de plasticidad de capas estabilizadas con cal

Capa	Ensayo	Valor Recomendado
Subrasante Fina	índice de plasticidad	$\leq 3\%$
	CBR	$\geq 3\%$
Materiales Granulares	Índice de plasticidad	$\leq 3\%$
	CBR	Según diseño

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá.

A partir de los documentos mencionados anteriormente y de los resultados obtenidos a lo largo de los tramos de prueba, se determinaron los umbrales recomendados de las propiedades físicas y mecánicas definidos en la especificación de Estabilización de Subrasantes elaborada en el LanammeUCR para la verificación de cumplimiento de requisitos mínimos de las modificaciones con diferentes aditivos.

3 CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN

El equipo de investigación que será responsable de la ejecución del proyecto de investigación, así como el tiempo que le dedicará a la misma.

Tabla 1. Responsables del proyecto de investigación

Investigador / Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Fabiola Miranda Argüello	Licenciatura	Interino	Investigador Principal	5	12
Tania Ávila Esquivel	Licenciatura	Interino	Investigador asociado	5	12

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Mora, A. "Estabilización de arcillas expansivas con cal". Informe Final del Proyecto de Graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 1993
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D6276: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization."
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort"
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures"
- American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO T 307-99: Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials". Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. XXVII ed., AASHTO, EUA, 2007.
- Parsons, L. R., Kneebone, E. (2004) *Use of Cement Kiln Dust for Subgrade Stabilization*. Kansas Department of Transportation.
- Milburn, J.P., Parsons, R.L. (2003). *Performance of Soil Stabilization Agents*. Kansas Department of Transportation.

- Little, N. D., Nair, S. (2009). *Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials*. National Cooperative Highway Research Program.
- Fauzi, A., Nazmi, M. W. (2013). *Subgrade Stabilization Assessment of Kuantan Clay using Lime, Portland Cement, Fly Ash, and Bottom Ash*. Universidad de Malasia Pahang.

