

**APLICACIÓN DEL RESIDUO DE MINERÍA DE YESO (LUTITA) COMO
ESTABILIZADOR DE SUELOS ARCILLOSOS EN SANTANDER**

**LISETTE FERNANDA BALLESTEROS ALVAREZ
NATHALIA ANDREA MANTILLA GÓMEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2014

**APLICACIÓN DEL RESIDUO DE MINERÍA DE YESO (LUTITA) COMO
ESTABILIZADOR DE SUELOS ARCILLOSOS EN SANTANDER**

**LISETTE FERNANDA BALLESTEROS ALVAREZ
NATHALIA ANDREA MANTILLA GÓMEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Geólogas
Modalidad proyecto de investigación**

Director

**GUILLERMO VARGAS PIESCHACON
Geólogo Esp. Geotecnia Ambiental**

Codirector

**MARTA PATRICIA RUIZ
Química M.Sc.**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2014**

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, que de manera amable y atenta nos abrió sus puertas y nos aportó conocimientos para nuestro desarrollo personal, en especial a la Escuela de Geología, por estos años en los cuales nos brindó las herramientas para nuestro desarrollo académico, personal y profesional.

A nuestros directores, el Geólogo Guillermo Vargas Pieschacon y la Química Martha Patricia Ruiz Ojeda, por su apoyo, paciencia y consejos brindados durante la realización de este trabajo.

A todo el grupo docente de la escuela de Geología, en especial a los Profesores Jairo Clavijo, Francisco Velandia, y Sait Khurama Velázquez quienes con su pedagogía y conocimiento contribuyeron a nuestra formación universitaria

Al Geólogo Phd. Carlos Alberto Ríos Reyes y el físico Carlos Chacón por su colaboración y eficiencia en la realización de los análisis de microscopía electrónica de barrido, al Dr. José Henao y el magister José Pinto que nos ayudaron con la realización de las pruebas de difracción de rayos X y al ingeniero Eduardo Alberto Castañeda por permitirnos realizar algunas pruebas en el laboratorio de Suelos, necesarias para la culminación exitosa de nuestra investigación.

A nuestros compañeros y amigos que estuvieron siempre y sin duda, este camino no hubiera sido el mismo sin ustedes.

DEDICATORIA

ADios, a mi familia y a mi futuro esposo;

En especial a mi madre, ya que ella siempre

Creyó en mí y nunca me dejó decaer,

Por ser mi apoyo, el motivo y la luz del

Camino que apenas comienza.

Fernanda Ballesteros

DEDICATORIA

A mis Padres Ludwig y Yolanda con los que estaré eternamente
agradecida, a ellos debo todo lo que soy y seré.

A todos mis hermanos en especial al Flaquito, quien me
enseñó el mayor ejemplo de lucha y tenacidad.

A Félix, el hombre de mi vida que con su amor y sonrisas ha
hecho de este un camino maravilloso.

Nathalia M.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	21
1. OBJETIVOS	23
1.1. OBJETIVO GENERAL	23
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. ANTECEDENTES	24
3. MARCO TEÓRICO	27
3.1. EL SUELO Y SU ORIGEN.....	27
3.1.1 Clasificación de suelos	28
3.1.2 Granulometría en suelos	30
3.1.3 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).	31
3.1.4 Minerales comunes en suelos arcillosos.	36
3.1.5 Descripción de las técnicas analíticas necesarias para la estabilización de suelos.	39
3.2. MINERÍA DE YESO	42
3.2.1 El Yeso	42
3.2.2 Proceso de extracción.....	43
3.3. RESIDUO DE MINERÍA.....	46
3.3.1 Lutita Compacta	48
3.3.2 Caracterización de la Lutita Compacta.....	48
3.3.3 Impacto ambiental generado por el residuo de Minería.	51
3.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	53
3.4.1 Estabilización Física.....	54

3.4.2	Estabilización Química.....	55
3.4.2.1	Estabilización con Cal.....	57
3.4.2.2	Estabilización con Cemento.....	59
3.4.2.3	Estabilización con Asfalto.....	61
3.4.2.4	Estabilización con Sales.....	62
4.	METODOLOGÍA.....	64
4.1.	ETAPA i – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	64
4.2.	ETAPA ii – FASE CAMPO Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS A ESTABILIZAR.....	64
4.2.1	Caracterización física de los Suelos a estabilizar.....	65
4.2.2	Caracterización química de los suelos a estabilizar.....	66
4.3.	ETAPA iii – FASE EXPERIMENTAL.....	66
4.3.1	Diseño Experimental.....	66
4.3.2	Ejecución experimental.....	69
4.4.	ETAPA iv– EVALUACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA.....	69
4.5.	ETAPA v– RESULTADOS E INFORME FINAL.....	69
5.	RESULTADOS.....	72
5.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA SUELO ORIGINAL.....	72
5.1.1	Suelo A- Qfe (Flujo de Escombros).....	72
5.1.2	Suelo B- Kip (Suelo Residual Formación Paja).....	74
5.2.	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS SUELOS ORIGINALES.....	77
5.2.1	Caracterización Química del Suelo A-Qfe.....	79
5.2.2	Caracterización Química Suelo B-KIP.....	86
5.3.	ADITIVACIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRAS.....	92

5.4.	CARACTERIZACIÓN MUESTRAS ADITIVADAS.....	96
5.4.1.	SUELO A-Qfe. (Aditivado1% Lutita+1%Cemento).....	96
5.4.2.	SUELO B Kip. (Aditivado1% Lutita+1%Cemento).....	104
6.	CONCLUSIONES	111
7.	RECOMENDACIONES.....	113
	BIBLIOGRAFÍA	114
	ANEXOS	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de Formación de Suelos Transportados.....	29
Figura 2. Clasificación granulométrica de los suelos, imagen a) Gravas, b) Arenas, c) Limo y d) Arcillas.....	31
Figura 3. Aparato de Casagrande para la determinación de LL (A), moldes de 3 mm de diámetro para determinar LP (B).....	34
Figura 4. Minerales arcillosos y su composición química.	38
Figura 5. Imagen del Yeso en sistema monoclinico.....	42
Figura 6. Secuencia estratigráfica de la Mina "El Diviso".....	45
Figura 7. Mina de Yeso "El Diviso", localizada en Los Santos, Santander, Colombia.....	46
Figura 8. Escombrera de la mina "El Diviso", Los Santos, Santander, Colombia. .	47
Figura 9. Principales efectos medioambientales de las actividades mineras.....	51
Figura 10 Métodos comunes de estabilización física. a) Mezcla de suelos, b) Geotextiles, c) Vibroflotación.	55
Figura 11. Proceso de estabilización con cal sobre una vía terciaria.....	58
Figura 12. Estabilización química con la mezcla de suelo-cemento.	60
Figura 13 Flujodiagrama De Procesos Y Actividades Para Llevar A Cabo Aplicación Del Residuo De Minería De Yeso (Lutita) Como Estabilizador De Suelos Arcillosos En Santander.....	71
Figura 14. Localización del Suelo A-Qfe.....	72
Figura 15 Muestra de suelo A (Qfe) sin aditivar.....	73
Figura 16 Localización del suelo B-Kip.....	75
Figura 17 Perfil del suelo Saprolítico de la Formación Paja mostrando desarrollo de suelo orgánico.....	76

Figura 18 Muestra de suelo B (Kip) sin aditivar.	76
Figura 19 Difractograma de la muestra del suelo A-Qfe.	81
Figura 20 Imagen del SEM EDS realizado a la muestra de suelo A-Qfe (NF-Qfe). Enfoque 1.	82
Figura 21 Espectrograma de la composición química del suelo A-Qfe en el Enfoque 1.	83
Figura 22 Imagen SEM EDS con enfoque en una región de elementos en el que se realiza el examen de composición para el suelo A-Qfe.	84
Figura 23 Espectrograma de la composición química de una región del suelo A- Qfe. en el enfoque 3.	85
Figura 24 Difractograma de la muestra del suelo B-Kip.....	87
Figura 25 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra de suelo B- Kip (NF-Kip). Enfoque 1.	88
Figura 26 Espectrograma de la composición química de una región del suelo B- Kip en el enfoque 1.	89
Figura 27 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra de suelo B- Kip (NF-Kip). Enfoque 2.	90
Figura 28 Espectrograma de la composición química de una región del suelo B-Kip en el enfoque 2.	91
Figura 29 Proceso de aditivación y mezcla del los materiales. A) Suelo A-Qfe Lutita+Cemento. B) Suelo Mezclado homogéneamente. C) Adición de agua. D) Suelo húmedo mezclado.	93
Figura 30 Muestras de suelo aditivadas dispuestas al tiempo curado.	94
Figura 31 Descripción de los resultados DRX del suelo Original y estabilizado. .	100
Figura 32 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Qfe-1 (NF-1Qfe).....	100

Figura 33 Espectrograma de la composición química de la muestra Qfe-1 en el enfoque 1.....	101
Figura 34. Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Qfe-4 (NF-Qfe).....	102
Figura 35 Espectrograma de la composición química de la muestra Qfe-4 en el enfoque 1.....	103
Figura 36 Descripción de los resultados DRX del suelo Original y estabilizado. .	107
Figura 37 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Kip-1 (NF-Kip).....	108
Figura 38 Espectrograma de la composición química de la muestra Kip-1 en el enfoque 1.....	109
Figura 39 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Kip-4 (NF-4Kip).....	109
Figura 40 Espectrograma de la composición química de la muestra Kip-4 en el enfoque 1.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Numero de tamiz y su tamaño en milímetros.....	32
Tabla 2 Símbolos de grupo (SUCS).....	34
Tabla 3 Tipología del suelo (SUCS).....	35
Tabla 4. Esquema y descripción de estructura lámina silícica y lámina alumínica.	37
Tabla 5 Clasificación de suelo y su uso de acuerdo al número de CBR.....	41
Tabla 6 Composición mineralógica y fases cristalinas de la Lutita Compacta.	49
Tabla 7 Muestra en sección delgada de la lutita compacta en nicoles cruzados y nicoles paralelos.	50
Tabla 8 Matriz del Suelo A-Qfe	67
Tabla 9 Matriz del Suelo B- Kip.....	67
Tabla 10 Matriz de diseño experimental 23 con las múltiples combinaciones del Suelo A-Qfe.	68
Tabla 11 Matriz de diseño experimental 23 con las múltiples combinaciones del Suelo B-Kip.....	68
Tabla 12 Condiciones establecidas para la elaboración de DRX.....	78
Tabla 13 Resultados Cuantitativo DRX para el suelo A-Qfe.....	80
Tabla 14 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 1.....	83
Tabla 15 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 3.....	85
Tabla 16 Resultados Cuantitativo DRX para el suelo B-Kip.	86

Tabla 17 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 1 del suelo B-Kip.....	89
Tabla 18 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 2 del suelo B-Kip.....	91
Tabla 19 Proporción en gramos para los Suelos A-Qfe y B-Kip en cada combinación.....	92
Tabla 20 Resultados índice de plasticidad para el suelo A-Qfe.....	95
Tabla 21 Resultados índice de plasticidad para el suelo B-Kip	95
Tabla 22 Caracterización física Suelo A-Qfe.	97
Tabla 23 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Qfe-1.....	98
Tabla 24 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Qfe-4.....	98
Tabla 25 Porcentaje atómico y porcentaje en peso de la muestra Qfe-1. (0.5 Lutita+ 0.5 Cemento).	101
Tabla 26 Porcentaje atómico y en peso de la muestra Qfe-4. (1% Lutita+ 1% Cemento). Enfoque 1.....	102
Tabla 27 Caracterización Física Suelo B-Kip.....	105
Tabla 28 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Kip-1.	106
Tabla 29 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Kip-4.	106
Tabla 30 Porcentaje atómico y en peso de la muestra Kip-1. (0.5% Lutita+ 0.5% Cemento). Enfoque 1.....	108
Tabla 31 Porcentaje atómico y en peso de la muestra Kip-4. (1% Lutita+ 1% Cemento). Enfoque 1.....	110

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Granulometría y Límites de Atterberg Qfe	117
Anexo B. Granulometría y Límites de Atterberg Qfe (aditivadas).....	118
Anexo C. Granulometría y Límites de Atterberg to Kip.....	124
Anexo D. Granulometría y Límites de Atterberg Kip (aditivadas).....	125
Anexo E. Proctor y CBR Qfe	137
Anexo G. Proctor y CBR Kip	145
Anexo H. Proctor y CBR Kip-#4 Lutita 1%+ Cemento 1% (7 días).....	149

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DEL RESIDUO DE MINERÍA DE YESO (LUTITA) COMO ESTABILIZADOR DE SUELOS ARCILLOSOS EN SANTANDER¹.

AUTORAS²: LISETTE FERNANDA BALLESTEROS ÁLVAREZ

NATHALIA ANDREA MANTILLA GÓMEZ

PALABRAS CLAVES: Estabilización química de suelos, química de suelos arcillosos residuo minero, reacciones puzolánicas, aditivos químicos.

DESCRIPCIÓN

La estabilización de un suelo es un proceso mediante el cual se busca mejorar de manera confiable las propiedades y características geotécnicas, tales como: la resistencia, compresibilidad, índice de plasticidad, esfuerzo a la deformación, densidad seca, entre otros. En el presente estudio se propuso mejorar dichas características de dos suelos denominados: Suelo A-Qfe y B-Kip; ambos con características arcillosas, pertenecientes a municipios del departamento de Santander. Para este propósito se utilizó el residuo de minería Lutita Compacta y Cemento, con el fin de estudiar nuevas alternativas económicamente viables y ambientalmente sostenibles.

El objetivo era aprovechar el contenido químico mineralógico de la Lutita, para que al ser combinada con el cemento diera paso a reacciones puzolánicas. Se evaluó la capacidad estabilizante de la lutita a partir la ejecución de una matriz experimental con 8 combinaciones posibles, con valores máximos y mínimos de Lutita+Cemento de 0.5 al 1% en concentración durante un tiempo de curado de 7 y 14 días. Al pasar este tiempo se determinaron los límites de Atterberg arrojando una disminución en el Índice de plasticidad. Las muestras de ambos suelos al 1% de Lutita+Cemento fueron seleccionadas para caracterizarlas física y químicamente. Los Ensayos de Proctor y CBR arrojaron resultados positivos pero no significativos, por otra parte química y mineralógicamente no hubo aparición de nuevas fases cristalinas, sin embargo hubo evidencia de reacciones puzolánicas en A-Qfe gracias a la disminución en el porcentaje de minerales amorfos. En B-Kip no se logró un aumento de las fases cristalinas ni cambios porcentuales significativos ni coherentes en proporción con la concentración de aditivos. Esto evidencia un mejoramiento en las características plásticas de los suelos A y B, pero no un incremento en su resistencia.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director: Geol. Guillermo Vargas Pieschacon- Codirector: MsC. Martha Patricia Ruiz.

ABSTRACT

TÍTULO: APPLICATION OF GYPSUM MINING WASTE (SHALE) AS CLAY SOIL STABILIZER IN SANTANDER³.

AUTHORS⁴: LISETTE FERNANDA BALLESTEROS ÁLVAREZ

NATHALIA ANDREA MANTILLA GÓMEZ

KEYWORDS: Chemical soil stabilization, soil chemistry, chemistry mining for clay soil mining residue, puzzolanic reactions, chemical additives.

DESCRIPTION

Soil stabilization is a process is a process that reliably improves the properties and geotechnical characteristics such as: strength, compressibility, plasticity index, effort to deformation, dry density among others. In this study it was aimed to improve these properties of two soils called: Soil A-Qfe and Soil B-Kip; both with clay features belong to municipalities of Santander. For this purpose the Shale Mining Compact and Cement, were used in order to explore new alternatives economically viable and environmentally sustainable.

The aim was to take advantage of chemical and mineralogical content of Compact Shale, that if mixed with cement, it would be puzzolanic reactions. The stabilizing ability of Shale was evaluated by execution of an experimental array with 8 possible combinations with maximum and minimum values of 0.5 at 1% Cement+Shale concentration, for a curing time of 7 to 14 days. As time passed the Atterberg limits determined the decrease in plasticity index. Samples of both soils at 1% of Shale and Cement were chosen to be characterized physically and chemically. The Proctor and California Bearing Ratio (CBR) tests showed positive but non-significant results, on the other side there was no appearance of new crystalline phase chemically and mineralogically, however there was evidence of puzzolanic reactions A-Qfe through the reduction in the percentage of amorphous minerals. In B-Kip increased crystalline phases or significant or consistent percentage changes in proportion on concentration of additives was not achieved. This shows an improvement in characteristics of plasticity in Soils A and B, but not an increase in strength.

³ Degree work

⁴ Engineering physicochemical faculty, Geology School, Director: Geologist Guillermo Vargas Pieschacon- Co-director: MsC. Martha Patricia Ruiz.

INTRODUCCIÓN

Según el instituto nacional de vías en Colombia, el 80 % de las vías en el territorio nacional son terciarias con unos 142.000 Km de red vial aproximada, de los cuales más del 60% se encuentra en un estado medio a deplorable. Las vías compuestas de materiales arcillosos son afectadas por los cambios volumétricos ante la ganancia o pérdida de agua y el aumento del tráfico pesado. En consecuencia, este tipo de vías no brindan una seguridad para la circulación de vehículos de carga y/o pasajeros, afectando directamente el desarrollo de comunidades en términos de comercio, educación, los servicios de emergencia (salud) entre otros.

Por otro lado el proceso de extracción del yeso, genera un residuo como subproducto conocido como lutita compacta, lo que implica la búsqueda de escombreras y sitios para su disposición final; actividad que genera un impacto ambiental en términos de: alteración del paisaje, modificación del hábitat ecológico, destrucción de cubierta vegetal, ruido, emisiones de polvo y sedimentación del mismo, modificación de cursos de agua y de niveles piezométricos, contaminación de suelos, de aguas superficiales y subterráneas.

A lo largo del tiempo se han implementado métodos de tratamiento y estabilización de suelos que han ayudado disminuir la inestabilidad que estos suelos presentan entre las más utilizadas se encuentran: la estabilización física-mecánica y la estabilización química, estas técnicas han implementado estudios que han llevado a utilizar la combinación de productos estabilizadores, tales como la utilización de cal, sales, cemento portland, yeso, productos asfálticos, mezcla con otros suelos, todo esto con el fin de dar soluciones y mejorar el comportamiento del suelo.

La estabilización química de suelos es considerada actualmente como una opción factible para el desarrollo y mantenimiento de vías terciarias en diferentes países

del mundo, gracias a las ventajas económicas comparadas con la pavimentación habitual de una vía.

En el presente trabajo de grado se plantea una nueva alternativa para estabilizar las vías terciarias en suelos arcillosos de Santander, aplicando residuos industriales, producto de la extracción de yeso (lutita compacta), como aditivo para mejorar la capacidad portante de suelos arcillosos con índices de plasticidad medios a altos. La lutita como agente estabilizante sería económicamente viable y ambientalmente sostenible, para la estabilización de suelos.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el residuo de minería de yeso (lutita compacta), como aditivo para estabilizar químicamente suelos de composición arcillosa con índices de plasticidad medios a altos en la rasante de vías terciarias del departamento de Santander.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar una caracterización física de los suelos arcillosos a estabilizar.
- Realizar una caracterización química de los suelos usando el método de Difracción de Rayos X (DRX).
- Describir petrográficamente las muestras de suelo con el fin de conocer su distribución mineral y textural con el método de microscopía electrónica de barrido (SEM)
- Evaluar el comportamiento físico-mecánico y químico de los suelos después de la estabilización con el residuo de minería.
- Determinar la concentración adecuada para la estabilización química de suelos usando el Residuo de minería de yeso como agente estabilizante.

2. ANTECEDENTES

El concepto de mejorar la capacidad de soporte de los suelos a través de su estabilización con aditivos es bastante antiguo⁵ aproximadamente desde hace más de 5000 años, McDowell⁶ menciona que en la antigua Mesopotamia y Egipto utilizaron ésta práctica para estabilizar los caminos de tierra, desde entonces las técnicas para estabilizar los suelos evolucionaron, en gran medida por el interés de los países en mantener sus redes viales en óptimo estado, a su vez por la necesidad de mejorar las propiedades geotécnicas del suelo para soportar obras civiles de mayor escala y magnitud.

La relación costo/beneficio en la estabilización química de suelos ha generado gran aceptación en la industria ingenieril, lo que ha dado paso al estudio de nuevos métodos e incursión con nuevos materiales que permitan mejorar las características físicas del suelo. Entre los materiales que se usan de manera convencional para estabilizar los suelos se encuentran el Cemento Portland, el Asfalto, Sales neutralizadas, y la Cal, también denominados agentes estabilizantes. No obstante, para determinar la cantidad de cada uno de estos materiales y establecer la relación aditivo versus el volumen de roca, depende en primera medida del tipo de material que se va a estabilizar y del agente estabilizante, que por lo general no suele sobrepasar el 10% en volumen de la mezcla Suelo - estabilizante.

En 1973 Atanur determinó que la cantidad de cal óptima podía ser del 5% e incluso podría llegar al 8% para tiempos de curado más prolongados, no obstante

⁵ De Solminihac et. al., Estabilización química de suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 1998, p. 1.

⁶ McDowell, C., Stabilization of soil with lime, lime-flyash and other lime reactive materials. Washington, DC., 1959, p.60-66.

Bell⁷ en 1993 en su trabajo de estabilización con cal para suelos y minerales arcillosos estableció que el porcentaje de cal óptimo se encuentra en el intervalo de 1-3%, sin dejar de tener en cuenta al tiempo de curado, ya que este factor influye de manera directa en el proceso de la estabilización. En ambos casos (cemento y cal) disminuyen de manera significativa el índice de plasticidad e incrementan la resistencia del material.

Para el cemento el porcentaje varía de acuerdo al comportamiento plástico que tenga el suelo, Raj en 1995 propone que el rango está entre el 6-10%, pero puede alcanzar incluso hasta el 14% en el caso de suelos arcillosos altamente plásticos, Del Sominihac⁸ en 1998 indica que si el suelo se comporta de manera muy plástica, antes de añadir el cemento se debe agregar cal para reducir el índice de plasticidad.

Las sales neutralizadas son otro material que se ha puesto en práctica para estabilizar suelos, siendo el cloruro de Calcio (CaCl_2) y el cloruro de Sodio (NaCl) las más comunes dada su disponibilidad y distribución geográfica, en este método se destaca el trabajo de Garnica et. al⁹, en el 2002 indica que el intervalo de sal neutralizada que se añade a un suelo para ser estabilizado varía entre el 0.5 y el 3%, el cual genera un refuerzo eléctrico en la película de agua que rodea a las partículas arcillosas, diversos autores coinciden en que la humedad relativa, el nivel freático y la alta solubilidad son las principales limitantes de esta técnica.

En general la búsqueda de nuevos materiales que permitan mejorar las propiedades geotécnicas de los suelos ha sido tema de investigación, autores

⁷ Bell, F., Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology. N° 42. p. 223-237. 1996.

⁸ De Solminihac et. al, Op., cit., p.12

⁹ Garnica et. al., Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica N° 201, México, 2002.

como Bell y Maud¹⁰ en 1994 mencionaron al yeso como un agente estabilizante no obstante, poca literatura respaldaba dicha premisa, hasta el 2009 cuando Yilmaz¹¹ elabora su trabajo de estabilización con yeso de suelos expansivos encontrando que el yeso puede ser utilizado para estabilizar, con un porcentaje del 5%, siendo 2 a 3 veces más económico que el uso de cal.

El residuo de minería de yeso, denominado lutita compacta fue inicialmente caracterizado por Pacheco y Rincón (2013), con el fin de evaluar las reactividad álcali-agregado pero se determinó que el material no era bueno para ser utilizado como mezclas de concreto¹², no obstante se continuó la línea de la investigación y se evaluó la aplicación en la estabilización química de suelos, trabajo elaborado por Mendoza y Murillo¹³ en el 2013, quienes observaron cambios favorables en el Índice de plasticidad del suelo pasando de 4% al 0%, con una concentración de lutita compacta del 1% y Cemento portland al 1%.

¹⁰ Bell, F., Maud, R., Dispersive soils and earth dams with some experiences from South Africa. Bulletin of the Association of Engineering Geologist. N° 31. P.433-466.

¹¹ Yilmaz, I., Civelekoglu, B., Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils. Applied Clay Science. N°44. Turkey, 2009.

¹² Pacheco Y., Rincón P., Caracterización de residuos de minería del yeso para evaluar la reactividad álcali-agregado. Trabajo de grado geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013. p. 111-116.

¹³ Mendoza E., Murillo E., Evaluación de la aplicación de residuos de minería de yeso (mesa de los santos, Santander) en la estabilización química de suelos. Trabajo de grado geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003. p. 95-106.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. EL SUELO Y SU ORIGEN

El "suelo" es un término al cual hacen referencia diferentes profesiones, entre ellas la Ingeniería Civil y la Geología. Para cada profesional el significado de éste varía con respecto al otro; para el geólogo el suelo se define como el material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por agentes atmosféricos¹⁴, mientras que para el ingeniero civil define al suelo como el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes¹⁵

Para definir el suelo de una región es necesario comprender el proceso de formación de las rocas y los depósitos que la conforman.

Los principales agentes que conllevan a la meteorización y posterior disgregación de la roca madre son: el agua, el aire, el clima, los agentes biológicos etc., cada uno de estos mecanismos pueden incluirse en dos procesos denominados como descomposición química y desintegración mecánica. Básicamente la descomposición química hace referencia a los agentes que atacan la roca modificando su química o mineralogía, principalmente por fenómenos de hidratación como por ejemplo el paso de anhidrita a yeso, la disolución de rocas carbonatadas por efectos del agua, el fenómeno de oxidación de los minerales ricos en hierro, entre otros. Por otra parte la desintegración mecánica se refiere a la exposición de la roca a agentes físicos, como cambios periódicos en la temperatura provocando diferencias de expansión y contracción y finalmente el

¹⁴ Chioffi N. J., Geología Aplicada a Ingeniería, Citado por CRESPO V. CARLOS, Mecánica de Suelos y Cimentaciones, México, Grupo Noriega Editores, 2005. p. 18

¹⁵ Ibíd., p. 18

rompimiento, o la acción del congelamiento de agua en las diaclasas y fracturamiento de la roca este proceso es llamado Gelifracción.

3.1.1 Clasificación de suelos

Los suelos se pueden diferenciar a grandes rasgos según su génesis o sus características geotécnicas. En cuanto a la génesis el suelo puede ser residual, transportado o entrópico, mientras que según sus características se han elaborado divisiones sistemáticas, atendiendo a la similitud de sus caracteres físicos y propiedades geomecánicas.

A grosso modo un suelo puede ser compuesto por partículas finas y/o partículas gruesas. Asimismo las cantidades o porcentajes relativos de cada una de las partículas minerales determinan la textura del suelo, así como sus propiedades físicas, químicas y biológicas¹⁶. A continuación una pequeña definición de los suelos residuales y transportados.

- **Suelo Residual**

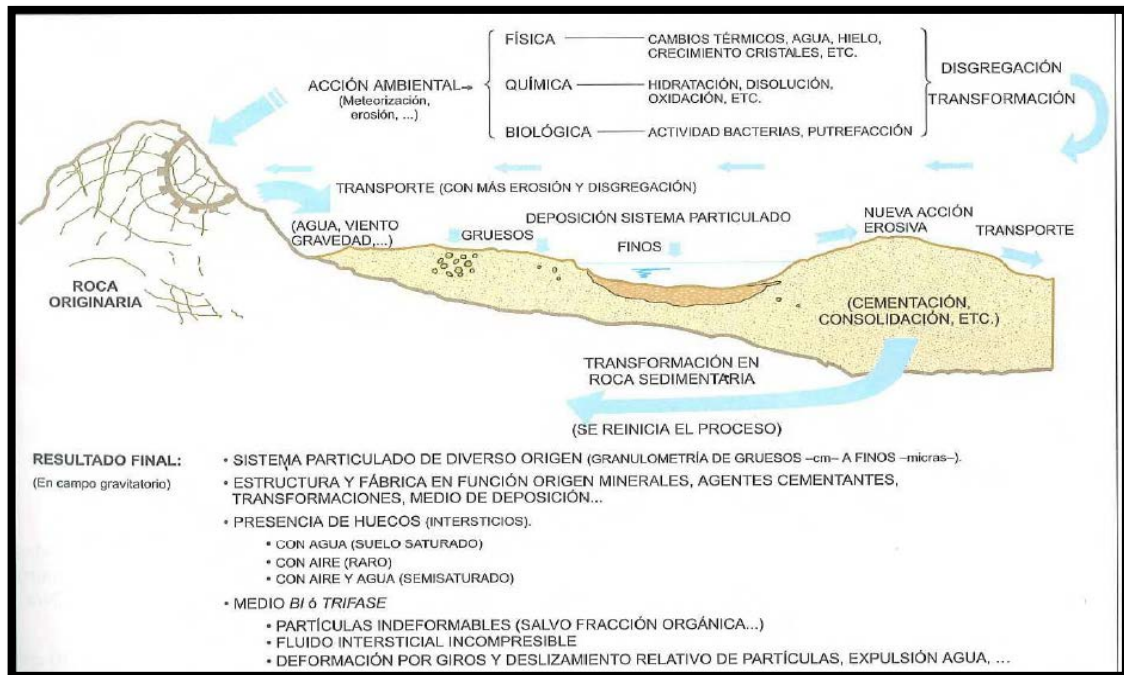
El suelo residual se genera como producto del intemperismo al cual se ha sometido la roca y se puede definir como el material terroso presente en el sustrato terrestre producto de la meteorización físico-química que ha sufrido un cuerpo rocoso, de origen ígneo, metamórfico y/o sedimentario y que puede o no contener materia orgánica. Para ser considerado suelo residual tiene que estar suprayaciendo la roca de la cual se deriva.

- **Suelo Transportado**

¹⁶ Volke *et al*, Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación, Secretaria de medio ambiente y recursos naturales, instituto nacional de Ecología, México. 2005. p. 19-31.

El suelo transportado se forma por la acción de los agentes geológicos que remueven los materiales superficiales, depositándolos o redepositándolo en zonas diferentes a las de su origen. La figura 1 muestra el proceso de generación de los suelos.

Figura 1. Proceso de Formación de Suelos Transportados.



Fuente: Ingeniería Geológica, Capítulo 2, p. 19

En la naturaleza los agentes que participan en el transporte de las partículas y soluciones que conforman suelos transportados son principalmente los glaciares, el viento, los ríos y las corrientes de agua superficial, el mar y la fuerza de gravedad. En la mayoría de los casos estos agentes actúan combinados. Un sus

partículas van desde materiales finamente granulados hasta grandes bloques¹⁷, que se generaron por la acción del desplazamiento de grandes masas de agua congelada, mientras que en los suelos de origen eólico los tamaños de partículas varían desde limos hasta arenas muy gruesas. En el caso de suelos cuyo origen es aluvial, los tamaños de partículas van a estar directamente relacionado con la capacidad de carga de la corriente, las características del fluido que la conforma y los materiales que conforman sus vertientes.

. Las clasificaciones de suelos más utilizadas son de la A.S.M.T (*American Society of Testing Materials*), la cual incluye el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) y el Sistema AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*).

3.1.2 Granulometría en suelos

Los suelos son materiales heterogéneos que varían física (tamaño de partículas) y químicamente por lo que se ha hecho necesario seguir una metodología estándar que evalúe las propiedades del suelo de manera comprensible y que sea aplicable para diferentes países. La metodología A.S.M.T (*American Society Of Testing Materials*) es la que se usa en Colombia para la clasificación de suelos según el tamaño de las partículas según la norma INV E-107-07, la cual propone una clasificación en función de la granulometría donde se han establecido cuatro grupos principales, los cuales son:

¹⁷ Juárez E., Rico A., *Mecánica de Suelos I: Fundamentos De La Mecánica De Suelo*, México, Noriega editores, 2005, p. 37.

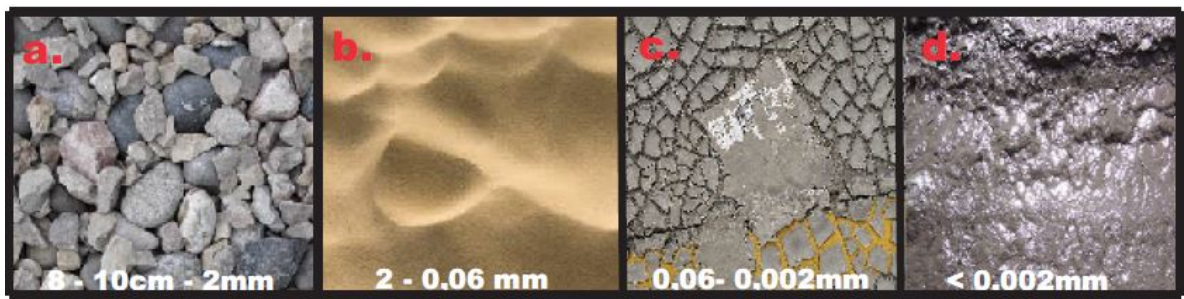
a) Gravas: Partículas cuyo diámetro oscila desde los 10 cm hasta los 2 mm; partículas que se pueden observar directamente. (Ver Figura 2, a.)

b) Arenas: Este grupo se comprende los granos cuyos tamaños varían entre 2 y 0,06 mm de diámetro. (Ver Figura 2. b)

c) Limos: Se denominan partículas tamaño limos aquellas comprendidas entre 0.06 y 0.002 mm de diámetro. (Ver Figura 2. c)

d) Arcillas: Son partículas con tamaño menor a 0.002 mm de diámetro. (Ver Figura 2. d)

Figura 2. Clasificación granulométrica de los suelos, imagen a) Gravas, b) Arenas, c) Limo y d) Arcillas.



3.1.3 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Se basa en la distribución granulométrica de las partículas que conforman el suelo y divide estos tres categorías; Suelos de grano grueso, Suelos de grano fino y suelos orgánicos además de los coeficientes de uniformidad ($C_u = D_{60\%}/D_{10\%}$) y curvatura ($C_c = (D_{30\%})^2 / (D_{10\%} * D_{60\%})$) y la relación de los límites Líquido y Plástico en la carta de plasticidad.

Esta información se obtiene a partir de pruebas de laboratorio normadas por la ASTM internacional. Las pruebas necesarias son, análisis granulométrico, límites líquido y límite plástico, de los que se obtiene el índice de plasticidad.

- **Análisis Granulométrico de suelos por tamizado**

Norma: I.N.V. E-123 El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de tamaños de partículas de suelo, por separación a través de una serie de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura de malla.

Tabla 1. Numero de tamiz y su tamaño en milímetros.

No.	m.m
3	70,10
2 1/2	64,00
2	50,00
1-1/2	37,50
1"	25,00
3/4	19,50
1/2	12,50
3/8	9,50
4	4,76
10	2,00
20	0,84
40	0,43
60	0,25
100	0,149
200	0,074

Según sean las características de los materiales finos de la muestra, el análisis con tamices se hace, bien con la muestra entera, o bien con parte de ella después de separar los finos por lavado. Si la necesidad del lavado no se puede determinar por examen visual, se seca en el horno una pequeña porción húmeda del material y luego se examina su resistencia en seco rompiéndola entre los dedos. Si se puede romper fácilmente y el material fino se pulveriza bajo la presión de aquellos, entonces el análisis con tamices se puede efectuar sin previo lavado.

- **Determinación del Límite Líquido, plástico e índice de plasticidad de suelos**

Norma: I.N.V. E-125 y 126.

Mediante este procedimiento se determina el límite líquido de un suelo, el cual es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado al horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.

Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de suelo de unos 3 mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos cilindros se desmoronen.

-Límites de Atterberg

Este método consiste en definir los límites correspondientes en los cuales puede presentarse el suelo: líquido, plástico o sólido, estos límites son; límite de liquidez (LL), el límite de plasticidad (LP) y el límite de retracción (LR). El índice de plasticidad está dado por la fórmula $IP=LL-LP$, a la resta del límite líquido menos el plástico

A continuación se describe parte del procedimiento que se realiza para obtener estos límites.

Límite líquido (LL): se define como la humedad, en relación al peso del suelo seco, que el convierte en suelo líquido. Se determina con la ayuda de un aparato de Casagrande que está compuesto de una pequeña copa metálica unida a un chasis mediante una excéntrica (Ver Figura 4, A) haciendo girar una manivela, la excéntrica levanta la copa y la deja caer libremente sobre la bancada desde una altura de 1 cm. Sobre la mitad de la superficie de la copa se coloca una capa del mortero que se desea estudiar, haciéndole un surco con la ayuda de un instrumento en v. el límite de liquidez se define como la humedad para la cual los

dos labios de la fisura se unen en una longitud de 1 cm, cuando se ha sometido a la copa una serie de 25 golpes.

Figura 3. Aparato de Casagrande para le determinación de LL (A), moldes de 3 mm de diámetro para determinar LP (B).



Límite Plástico (LP): se define como la humedad para la cual el mortero se convierte en plástico, es decir, se puede amasara todavía antes de perder toda coherencia. Experimentalmente el límite de plasticidad es la humedad que permite amasar el suelo sin deshacerlo en moldes de 3mm de diámetro.

El S.U.C.S se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades, en las tablas 1 y 2 se describen estos símbolos y su significado.

Tabla 2 Símbolos de grupo (SUCS)

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien graduado	W

Arena	S	Pobremente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Limite liquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Limite liquido bajo (<50)	H

Fuente: Modificado Gonzales et al., 2002 libro ingeniería geológica.

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

Tabla 3 Tipología del suelo (SUCS)

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS GENERALES		
GW GP GM GC	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Pobremente graduadas
			Componente limoso
			Componente arcilloso
SW SP SM SC	ARENAS (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Permanentemente graduadas
			Componente limoso
			Componente arcilloso
ML MH	LIMOS	Baja Plasticidad (LL<50)	
		Alta Plasticidad (LL>50)	
CL CH	ARCILLAS	Baja Plasticidad (LL<50)	
		Alta Plasticidad (LL>50)	
OL OH	SUELOS ORGANICOS	Baja Plasticidad (LL<50)	
		Alta Plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

Fuente: Modificado de Gonzales et al., Libro de Ingeniería Geológica, 2002.

- **Humedad Natural**

Norma: I.N.V. E- 122

La determinación de la humedad natural consiste determinar el contenido de agua en un suelo, es conocer la masa del agua removida al secar dicho suelo cuando está húmedo (espécimen de prueba) hasta un peso constante, en un horno

controlado a $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{ F}$); y usar este valor como la masa del agua en el espécimen de prueba. La masa del suelo remanente después de secado en el horno, corresponde a la masa de las partículas sólidas. El contenido de agua se calcula relacionando la masa de agua en el suelo húmedo con la masa del suelo seco.

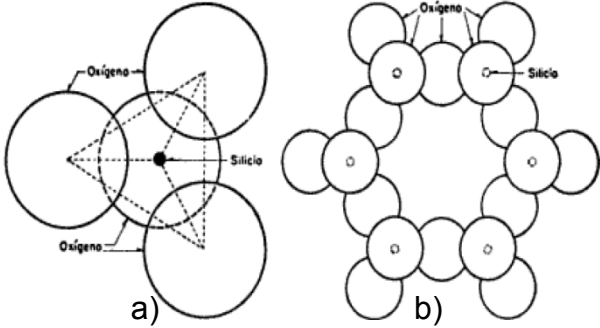
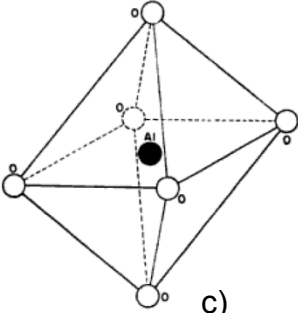
3.1.4 Minerales comunes en suelos arcillosos.

Mineralógicamente en los suelos compuestos por partículas de tamaño grueso (gravas y arenas) predominan minerales del grupo de los silicatos, principalmente feldespato potásico, sódico o cálcico, micas, olivino, serpentinita, etc.; Óxidos, que conforman la gran mayoría entre los que se encuentra el cuarzo (SiO_2), limolita, magnetita y el corindón. Minerales carbonatados como la calcita, la dolomita, sulfatos como anhidrita y yeso.

Las arcillas están conformadas por diferentes grupos minerales, en su mayoría silicatos que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas que han sufrido procesos de descomposición química hasta dar lugar a éstas partículas.

El comportamiento mecánico de las arcillas está determinado por la mineralogía que la compone, lo cual es de gran importancia para fines geotécnicos e ingenieriles; se componen de silicatos de aluminio hidratados, también se presentan silicatos de magnesio, hierro u otros metales hidratados. La estructura molecular es definida por átomos que se disponen en láminas, las cuales corresponden a la sílica y la alumínica, en la tabla 4 se observan los esquemas de las estructuras lámina silícica y lámina alumínica

Tabla 4. Esquema y descripción de estructura lámina silícica y lámina alumínica.

Estructura lámina silícica	Estructura lámina alumínica
	
<p>Compuesta de un átomo de Silicio rodeado por cuatro átomos de aluminio en forma de tetraedro figura a), asimismo estos tetraedros de agrupan y conforman estructuras hexagonales unidas por el átomo de oxígeno. La repetición indefinida de dichas moléculas conforma las láminas silícicas.</p>	<p>Se conforma por un átomo de aluminio en el centro y seis de oxígeno alrededor, formando así retículas de octaedros (figura c).</p>

Según la estructura reticular los minerales arcilla se clasifican en tres:

- **Caolinita** ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): Se compone por una lámina silícica y otra alumínica que se superponen indefinidamente de manera fuerte, de tal manera que se hace impenetrable a las moléculas de H_2O entre las laminas

(adsorción), lo que proporciona a la caolinita un comportamiento más estable en presencia de agua.

- **Montmorilorita** $[(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}]$: Compuesta por una lámina alumínica entre dos silícicas superponiéndose de manera indefinida. Esta unión es débil, por lo que se facilita el proceso de adsorción de las partículas de agua a causa de su naturaleza dipolar. Este proceso genera un incremento del volumen a nivel cristalino, luego a nivel macro se convierte en una expansión. Geotécnicamente los suelos con presencia de minerales arcilla tipo montmorilorita presentarán inestabilidad ante la presencia de agua.
- **Illita** $[(\text{OH})_4 \cdot \text{K}_y(\text{Si}_{8-y} \cdot \text{Al}_y)(\text{Al}_4 \cdot \text{Fe}_4 \cdot \text{Mg}_4 \cdot \text{Mg}_6) \cdot \text{O}_{20}]$: Su estructura es semejante a la de la montmorilorita, no obstante la illita internamente manifiesta una tendencia a formar grumos, los cuales reducen considerablemente el área que se encuentra expuesta al agua por unidad de volumen, lo que hace que su comportamiento expansivo sea menor que el de las montmorilorita. Siendo de esta manera la illita un mineral arcilloso de propiedades geotécnicas relativamente favorables.

Figura 4. Minerales arcillosos y su composición química.

Mineral	Composición
Caolinita	$\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$
Montmorilonita	$\text{Si}_{24}\text{O}_{60}\text{Mg}_2(\text{OH})_{12}(\text{Na}_2\text{Ca})$
Illita	$(\text{Si}_2\text{Al}_2) (\text{O}_5\text{K}) (\text{Al Fe Mg}) (\text{OH})$
Atapulgita	$\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Mg}_5(\text{O}_2\text{H})_4 \text{H}_2\text{O}$

Fuente: López V. et al, 2003.

3.1.5 Descripción de las técnicas analíticas necesarias para la estabilización de suelos.

- **Análisis por Difracción de Rayos X Procedimiento según Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD)**

El procedimiento consiste en la maceración de una muestra de agregado mineral, lo cual se realiza en un mortero de ágata y seleccionando el material que pasa por una malla de 45 μm . Este material es colocado en el portamuestras del Difractómetro para identificar cualitativamente las fases presentes en la muestra, lo cual se logra mediante comparación de las reflexiones del perfil observado con las reflexiones de los perfiles de difracción reportados en la base de datos del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD), utilizando el software respectivo.

- **Microscopía Electrónica de Barrido “Scannig Electron Microscopy” (SEM)**

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos.

Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

La preparación de las muestras es relativamente sencilla las principales características son: muestra sólida, conductora. Caso contrario, la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. De lo contrario, las muestras no conductoras se trabajan en bajo vacío.

- **Proctor Modificado**

Norma: I.N.V. E-142

Este método se emplea para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado, con un martillo de 4.54Kg que cae desde una altura de 18 pulgadas.

El procedimiento consiste en la compactación de una muestra en el molde correspondiente con la energía del martillo mencionado anteriormente, distribuyéndose en 5 capas de 55 golpes cada una.

Para obtener la gráfica necesaria, se debe adicionar porcentajes de agua progresivamente a medida que se compacta cada punto. El ensayo se puede concluir cuando se encuentre una distribución de humedad vs. Peso, de comportamiento ascendente al principio, y posteriormente en descenso para obtener el pico que represente la humedad óptima.

Este valor indica la humedad a la cual el material va a permitir una mejor compactación en campo. En este caso se obtuvo, para facilitar el mezclado del agregado en frío.

- **Ensayo de CBR**

Norma: I.N.V. E – 148

Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado relación de soporte de California, que es muy conocido debido a su origen, como CBR (California Bearing Ratio). Este método de ensayo está proyectado, aunque no limitado, para la evaluación de la resistencia de materiales cohesivos que contengan tamaños máximos de partículas de menos de 19 mm (3/4”).

Este método de prueba se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, sub-base y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El valor de CBR obtenido en esta prueba forma parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles.

Tabla 5 Clasificación de suelo y su uso de acuerdo al número de CBR.

CBR	Definition of soil	Usage	Classification	
			USCS	ASSHO
0-3	Very bad	Subgrade	OH,CH,MH,OL	A5, A6, A7
3-7	Bad-middle	Subgrade	OH,CH,MH,OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Middle	Subbase	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Well	Base and subbase	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A1b, A2-5, A3, A2-C
Bigger than 50	Very well	Base	GW,GM	A1a, A2-4, A3

Fuente: Aytেকyn, 2004

3.2. MINERÍA DE YESO

La minería de yeso es una actividad humana milenaria, ya que es considerado uno de los materiales más antiguos empleado en la construcción.

3.2.1 El Yeso

El yeso es una roca sedimentaria no clástica, compuesta por sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con un 20 % en agua, cristalográficamente presenta un sistema monoclinico. Las capas del grupo $(\text{SO}_4)^{2-}$ se encuentran fuertemente enlazadas a Ca^{2+} , las cuales están separadas por moléculas de H_2O .

En la naturaleza se da a manera de bancos, e intercalaciones en arcillas calcáreas, también se puede encontrar asociada a sales en series evaporíticas. Se pueden encontrar dos variedades de yeso; la gypsita en forma impura y el alabastro como una variedad traslucida de grano fino.

Figura 5. Imagen del Yeso en sistema monoclinico.



Fuente: Esteban L., 2009.

Su propiedad más importante consiste en que una vez calcinado, se le añade agua y se convierte en yeso de París entre otros yesos de fraguado rápido. Aproximadamente 90 por ciento del yeso producido se emplea en la construcción en forma de mortero, cementos y enlucidos¹⁸. El yeso tiene diferentes aplicaciones en diversas industrias, las principales son:

- **Construcción:** dadas las propiedades bioclimáticas, térmicas, mecánicas y estéticas se utiliza en guarnecidos, prefabricados, relieves arquitectónicos, piezas de decoración, a su vez cumple un papel esencial como agente retardante en la producción de cemento.
 - **Industria de la cerámica:** elaboración de moldes de cerámica, en litógrafos, esculturas, portalibros, lámparas, ceniceros, etc.
- Agricultura: ayuda a neutralizar los suelos alcalinos y salinos también mejora la permeabilidad de los materiales argiláceos; proporciona azufre y mejora la utilización de fertilizantes.

3.2.2 Proceso de extracción.

Una de las ventajas de la extracción del Yeso es que se encuentra de manera natural en las rocas, por lo que el proceso requerido para convertirlo en producto es relativamente sencillo, pese a esto es necesario que el porcentaje de sulfato cálcico oscile entre el 80 y 85%; este porcentaje aplica para el yeso común, sin embargo para la escayola especial la concentración debe estar entre el 92-95%.

Usualmente la explotación de yeso se da a cielo abierto cuando la roca de interés aflora en superficie, aunque también puede extraerse a través de minas subterráneas, cuya estructura y forma se encuentran sujetas al tamaño del

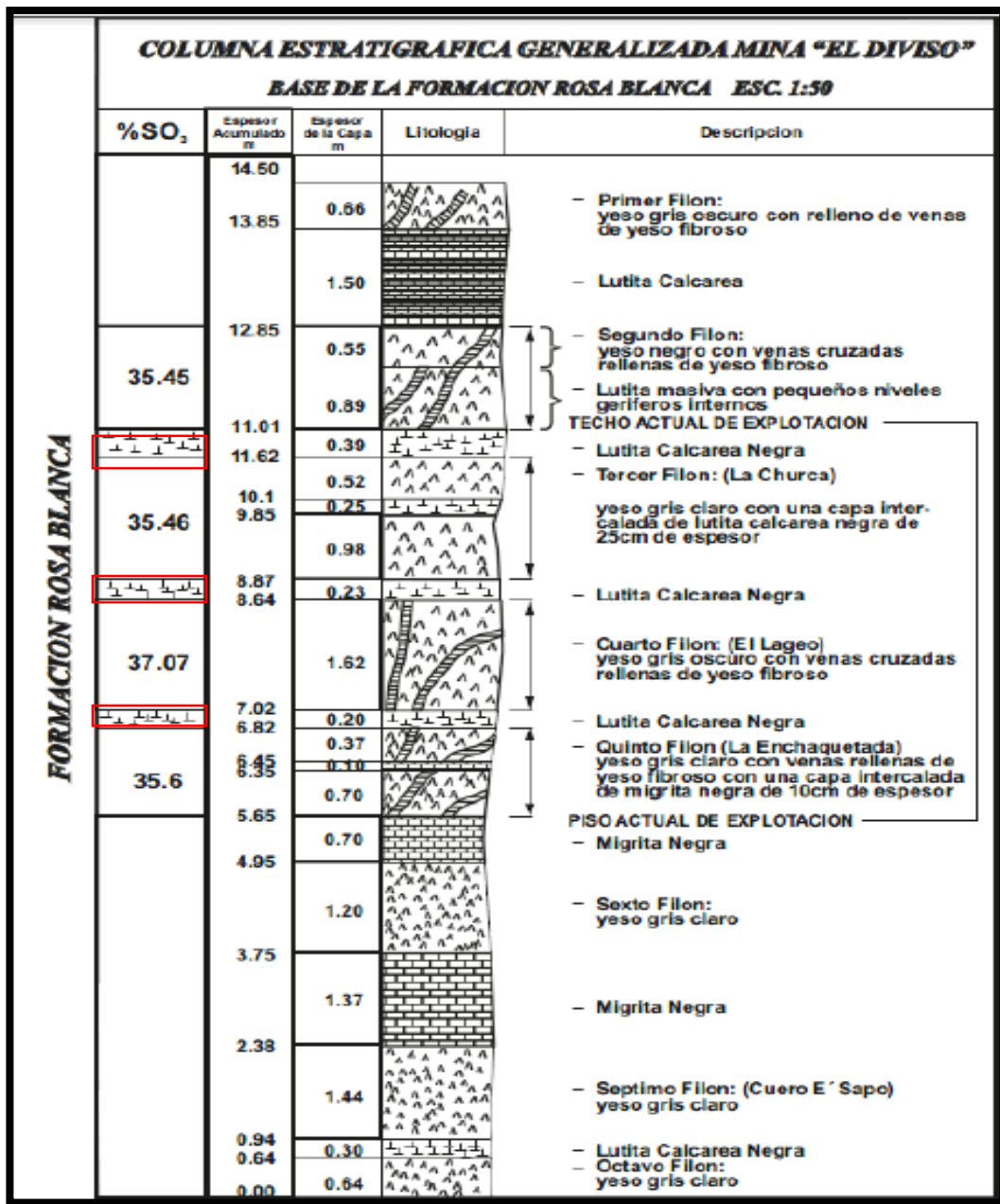
¹⁸ LOPEZ V., *et al.* Rocas Industriales en Venezuela. Fundacite Aragua Editores, Venezuela, 2003. p.18.

yacimiento, la estructura geológica en la que se encuentra contenida, entre otros factores.

En el caso específico de la mina "El Diviso", el proceso de extracción se realiza sobre la potente secuencia de la Formación Paja. La geoforma presente es un escarpe con estratos dispuestos de manera subhorizontal.

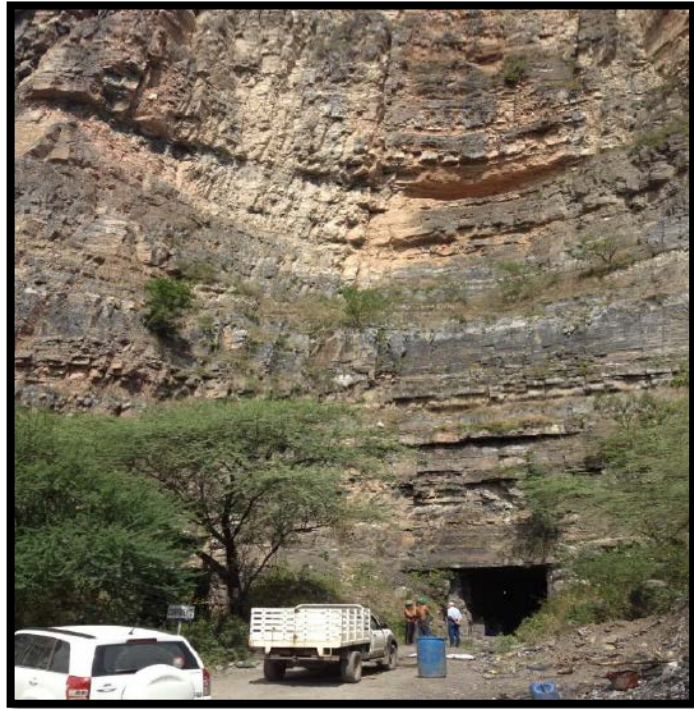
En la figura 6 se observa la columna estratigráfica de ésta mina que fue levantada por Pacheco y Rincón en el año 2013, en colaboración con CEMEX donde describen una secuencia de lutitas calcareas negras aproximadamente de 0.3 m de espesor intercaladas con 8 filones de yeso gris claro cuyo espesor varia de 0.6 a 1.5 m. El nivel de explotación actual va desde el Quinto hasta el Tercer filón. La extracción se realiza manera subterránea, con un túnel de 105 m de profundo, que se encuentra interconectado con cinco túneles internos que llegan a cada filón. Para extraer el material se utilizan explosivos de alto orden (ANFO), donde es extraído y trasladado a las afueras de la mina "El Diviso" (ver figura 7).

Figura 6. Secuencia estratigráfica de la Mina "El Diviso".



Fuente: Modificado de Pacheco y Rincón en Colaboración con CEMEX. Tesis UIS, 2013.

Figura 7. Mina de Yeso "El Diviso", localizada en Los Santos, Santander, Colombia.



Fuente: Pacheco y Rincón, Tesis UIS, 2013.

3.3. RESIDUO DE MINERÍA.

Para obtener un producto a comercializar, es decir una roca o mineral en específico, es necesario extraer una gran cantidad de materiales estériles¹⁹, estos materiales extraídos como producto de la explotación, se les denomina residuos de minería.

¹⁹ Modificado de Romero E., Residuos Mineros. Universidad de Huelva. Ingeniería Ambiental. España, 2007, p. 3.

En la minería industrial a estos residuos, se les suele buscar un uso para mitigar el impacto ambiental que ocasionan. Dado que su volumen, precisa de la adecuación de grandes escombreras. Hay diferentes tipos de residuos de minería, están los peligrosos (para el caso de los lixiviados) y los inertes que es el caso puntual de la lutita compacta, a continuación una breve definición:

- **Residuo minero inerte:** Son residuos que por lo general se dan en estado sólido y no experimentan una transformación fisicoquímica o biológica significativa, sin embargo la acumulación de grandes cantidades puede representar daños a nivel ambiental a nivel paisajístico u ecológico.

Figura 8. Escombrera de la mina "El Diviso", Los Santos, Santander, Colombia.



Fuente: Pacheco y Rincón, Tesis UIS, 2013.

En la figura 8 se observa la escombrera donde es depositado el residuo de minería inerte (lutita compacta), como producto de la extracción de los filones de yeso. Este residuo fue caracterizado por Pacheco y Rincón, 2013 con el fin de evaluar las reacciones Álcali-agregado. En la presente investigación se parte de dicha descripción para describir a la lutita compacta.

3.3.1 Lutita Compacta

La lutita es una roca sedimentaria que se compone por partículas de tamaño limo y arcilla, a nivel global constituyen más de la mitad de las rocas sedimentarias cuya presencia puede estar asociada a recursos minerales, energéticos o de construcción. En el caso del presente proyecto de grado la Lutita que se va aplicar como estabilizador químico que se presenta a manera de residuo de minería producto de la extracción del yeso en la mina "El Diviso", Los Santos, Santander.

Al ser la lutita una roca compuesta por limos y minerales arcillas, microestructuralmente hace que tengan una orientación preferente y laminar lo que hace que sea común encontrar este tipo de roca con fisilidad la cual se define como la propiedad que posee alguna roca de dividirse fácilmente en capas finas a lo largo de poco espaciados, más o menos planas, y paralelas a las superficie²⁰.

3.3.2 Caracterización de la Lutita Compacta.

Dado los tamaños de sus partículas, es necesario acudir a métodos de microscopía electrónica de barrido para visualizarlas de manera definida y

²⁰ Modificado de Bates y Jackson. Glosary of Geology, 2nd ed., American Geological Institute, p. 749.

difracción de rayos X para determinar de manera correcta su contenido mineralógico.

La lutita compacta está compuesta por siete fases cristalinas que componen el 58.4% de la muestra y un 41.6 % correspondiente amorfos y otros. Los minerales que tiene en mayor proporción son la calcita magnesiana con un 40.4%, cuarzo con un 6.1% y yeso con un 5.3%.

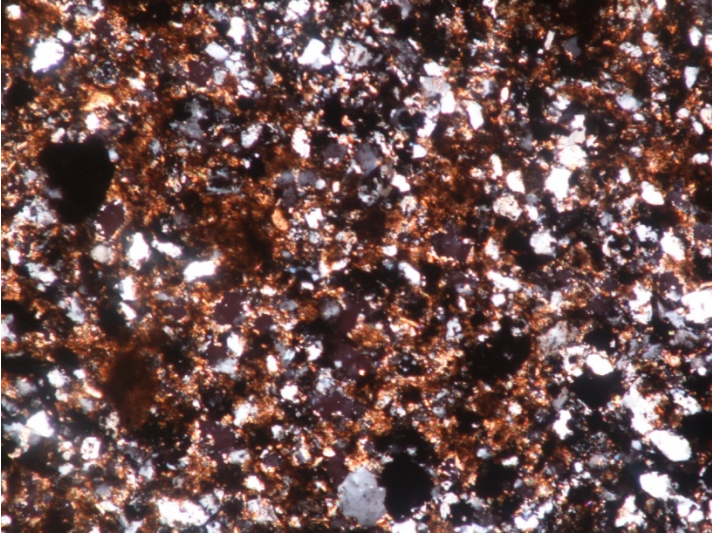
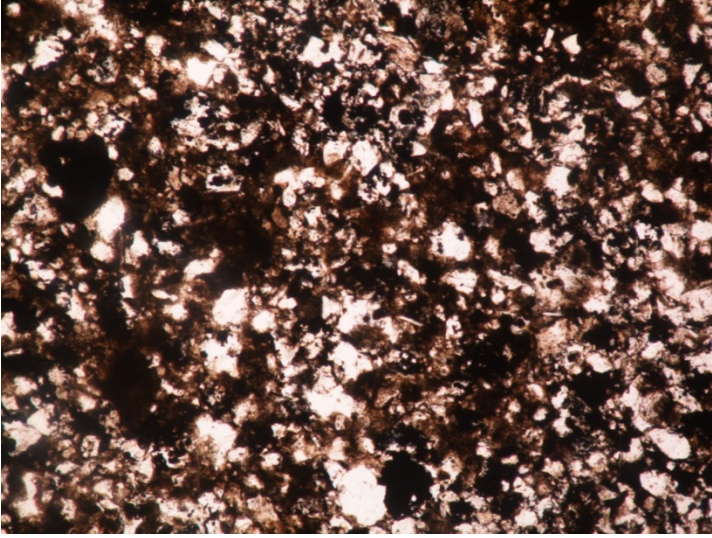
Tabla 6 Composición mineralógica y fases cristalinas de la Lutita Compacta.

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	$Fe S_2$	Pirita	<1 %
	$Si O_2$	Cuarzo	6.1 % (0.1)
	$Ca (SO_4)$	Anhidrita	4.7 % (0.1)
	$Fe_2 O_3$	Hematita	N.C
	$Ca (SO_4) (H_2 O)$	Yeso	5.3 % (0.1)
	$(Mg_{0.03} Ca_{0.97}) (CO_3)$	Calcita Magnesiana	40.4 % (0.3)
	$K Al_2 Si_3 Al O_{10} (OH)_2$	Moscovita	1.4 % (0.1)
	Total Cristalino		58.4 %
	Amorfos y otros		41.6 %

Fuente: Mendoza y Murillo, 2013. Laboratorio de Difracción de Rayos X, UIS, Guatiguará.

En la tabla 7 se observan las imágenes de lutita compacta en el microscopio de luz transmitida con nicoles paralelos (a) y nicoles cruzados (b). Petrográficamente se puede describir como una muestra heterogénea con cristales de geometría anhedral y tamaños que varían desde limos y arcillas para los segmentos donde se observa una textura terrosa a arena muy fina donde son evidentes los fragmentos cristalinos. Mineralógicamente se observan cuarzo, feldespato, óxidos de hierro, moscovita, calcita; esta composición mineralógica se confirma a partir de la difracción de rayos X.

Tabla 7 Muestra en sección delgada de la lutita compacta en nicoles cruzados y nicoles paralelos.

a) Muestra Petrográfica de lutita compacta en Nicoles Cruzados. NX

b) Muestra Petrográfica de lutita Compacta en Nicoles Paralelos. NP


3.3.3 Impacto ambiental generado por el residuo de Minería.

La minería se ha consolidado en el de mayor interés en la economía Colombiana; durante el 2001 esta actividad estuvo en pleno auge y las perspectivas son absolutamente alentadoras para los años venideros²¹; A nivel nacional la industria minera es una de las principales fuentes para la extracción de materiales, que son necesarios en el desarrollo de proyectos de construcción, producción de minerales, entre otras actividades de producción. Toda operación que involucre la minería produce un impacto ambiental.

En la figura 9 son ilustrados, en resumen los principales efectos ambientales asociados a la minería.

Figura 9. Principales efectos medioambientales de las actividades mineras.



²¹ Naranjo. F., Solano. V, Impactos ambientales. Universidad de la Guajira. Colombia, 2011, p. 3.

En Colombia el impacto ambiental generado, ha sido muy variable, debido a la diversidad en cuanto a las formas de extracción y explotación que se desarrollan en los diferentes departamentos del país, también por la pluralidad de minerales explotables. Cabe aclarar, que la explotación minera en Colombia se realiza aproximadamente en un 80% de forma artesanal, el 20% restante se reparte entre la minería de multinacionales y en la pequeña minería; es por esto que se desarrollan diversos impactos ambientales para cada departamento. Por ejemplo; en el departamento de Santander se reconoce actividades mineras metálicas (oro), no metálicas (caliza, yeso) y de combustibles (carbón), aunque este departamento posee en su mayoría atributos mineros, la explotación de estos recursos no renovables generan un impacto significativo al medio ambiente a partir de su extracción, trayendo como consecuencia el lavado de grandes extensiones de suelo, una vasta deforestación de los mismo, también genera la disminución en los caudales de las redes hídricas aledañas y contaminación de estas, cabe aclarar que el impacto ambiental generado no es tan significativo a nivel nacional ya que es mitigado con la creación y ejecución de planes de gestión ambiental que conllevan al cuidado del medio ambiente, también porque es una minería que se da a una escala media, comparada con otros departamentos que tienen esta actividad a grandes escalas dichos departamentos son: Antioquia (algunas piedras preciosas, metales preciosos, caliza y carbón), Boyacá (esmeralda, carbón, hierro, caliza), Caldas (oro, caliza, cobre, arcilla) , Caquetá (oro, bauxita, cadmio, cobalto, cobre, estaño, hierro, molibdeno, niobio, tántalo, Pirita, Plomo, Titanio, Tungsteno, Uranio, Zinc, arenas silíceas, Diatomitas, Evaporitas, Yeso, Feldespato, Fosfato, Mica, carbón, asphaltina, Asfalto líquido, Arcilla y mármol), Cesar (arena, grava, recebo, arcilla, caliza, mármol, rocas ornamentales, oro, plata, barita y principalmente el carbón), Choco (oro, platino, molibdeno, zinc), Córdoba (ferroníquel, carbón y oro), Guajira (carbón, sal, yeso, barita, oro, mármol, arcilla y caliza), entre otros²².

²² Naranjo. F., Solano. V, Impactos ambientales. Universidad de la Guajira. Colombia, 2011.

Para la Mina “El Diviso” ubicada en la Mesa De Los Santos, departamento de Santander, el impacto ambiental que genera en la extracción del yeso se puede observar en los botaderos o centro de acopio donde es depositado un material estéril constituido principalmente por lutita, este se encuentra muy próximo a la ubicación de la mina generando impacto en el ambiente como: Alteración en el paisaje, Destrucción de la cubierta vegetal, Ruido, Emisión de polvo y sedimentación del mismo, Generación de residuos, Contaminación de suelos²³.

3.4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Cuando el suelo presenta problemas de inestabilidad, índice de consistencia inadecuada, alta permeabilidad, o cualquier otra propiedad indeseable que los hace inadecuados para el desarrollo de un proyecto de construcción vial, probablemente debe ser estabilizado²⁴.

La estabilización de un suelo es un proceso metodológico mediante el cual se busca mejorar de manera confiable las propiedades y características geotécnicas, tales como: la resistencia, compresibilidad, índice de plasticidad, esfuerzo a la deformación, entre otros. Este método consiste en disminuir la cantidad de vacíos en el material para que se comporte de una manera más homogénea, a través de procedimientos que unen las partículas de manera significativa, a partir de las estabilizaciones físicas, químicas o fisicoquímicas.

Para evaluar el cambio de las propiedades y características físicas se hace necesario comparar las variaciones en los parámetros Geotécnicos:

²³ Pacheco. Y., Rincón. M., Caracterización de residuos de minería del yeso para evaluar la reactividad álcali-agregado. Universidad Industrial de Santander. Geología. Colombia, 2013, p. 52-54.

²⁴ Bowles. J., Physical and Geotechnical properties of soils. Second Edition, McGraw-Hill Education. 1984. P.1 -576.

Humedad Natural

Límites de Atterberg (Limite líquido y Limite pastico)

Densidad y Humedad Optimas de compactación (Proctor Modificado)

Resistencia (Ensayo de California Bearing Ratio (CBR).

En cuanto a las variaciones composicionales se pueden emplear:

Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Difracción de rayos X (DRX).

Estos ensayos permiten evaluar la respuesta del suelo antes y después de ser estabilizado con el residuo de minería.

3.4.1 Estabilización Física.

Este tipo de estabilización involucra cambios físicos en el suelo a tratar, los métodos con mayor uso son: la mezcla de suelos de diferentes granulometrías con el fin de generar un cambio en la gradación natural del suelo compuesto con mejores propiedades físico-mecánicas. También se encuentran los geotextiles (control de erosión) y la vibroflotación (reacomodamiento de los granos del suelo a partir de vibraciones horizontales).

Figura 10 Métodos comunes de estabilización física. a) Mezcla de suelos, b) Geotextiles, c) Vibroflotación.

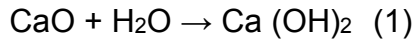


3.4.2 Estabilización Química.

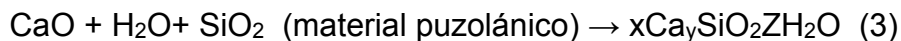
El concepto de mejorar la capacidad de soporte de los suelos a través de su estabilización con aditivos es bastante antiguo, aproximadamente hace más de 5000 años ya se elaboraban mejoras a suelos con cal y puzolanas²⁵. Este proceso se denomina como estabilización química, en el cual se busca modificar las propiedades químicas del suelo mezclando ciertos materiales que van a comportarse como agentes cementantes de manera que se produzcan cambios en las propiedades moleculares superficiales de las partículas de suelo, juntándolas entre sí, produciendo un incremento en su resistencia. Entre los aditivos más utilizados están la cal, el cemento Portland, asfalto, cloruro de sodio, cloruro de calcio, y las cenizas volantes. Los porcentajes óptimos de cada agente estabilizante son variados entre diversos autores, por lo que hay que tener en cuenta las características del suelo a estabilizar y las condiciones climáticas del entorno. Al usar un agente estabilizante tipo inorgánico, solubles en agua, como por ejemplo la cal viva, cal apagada, las sales de cloruro o el cemento, se espera que a nivel micro, aumente la actividad puzolánica que se produce al mezclarse el suelo-estabilizante, para de esta manera formar compuestos con propiedades

²⁵ De Solminihac et. al., Op. cit., p.1-5.

cementantes, dando como resultado un reacción de combinación o síntesis. El proceso químico de la "reacción puzolánica" está dado por las ecuaciones:



Se suma (1) y (2), como resultado se obtiene:



Una ecuación balanceada está dada por:

$\text{CaO} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_2\text{2H}_2\text{O}$, esto significa que 56g de CaO reacciona con 60g de SiO₂ y 36g de agua se mezclan para reaccionar un obtener 136g de silicato de calcio dihidratado, CaSiO₂2H₂O (CSH). Esto significa que la relación calcio-silicato es de aproximadamente 6/5 y la relación silicato-agua es de 6/4²⁶.

El presente trabajo de grado busca aprovechar el contenido químico-mineralógico de la lutita compacta, para que al ser mezclada con cemento Portland sirva como aditivo para la estabilización química de suelos arcillosos y determinar la concentración adecuada de lutita compacta que sea más favorable a reacciones puzolánicas.

A continuación se mencionan algunas técnicas de estabilización química y los efectos que cada agente estabilizante tiene sobre el material a estabilizar.

²⁶ Shi & Day, 2000; Sahin & Oltulu, 2011.

3.4.2.1 Estabilización con Cal.

Este método se ha utilizado ampliamente para disminuir la hinchazón, el potencial de expansión y las presiones en arcillas expansivas²⁷; ha presentado como resultado la generación de productos cementantes debido a varias reacciones dadas entre el suelo y la cal (Ver ecuación 3). En algunos como en suelos granulares finos cuyo índice de plasticidad sea mayor a 10 el uso de la cal responde de una manera más favorable como estabilizante²⁸.

Uno de los factores que se debe tener en cuenta al momento de elaborar la estabilización con cal es el porcentaje de aditivo necesario que se requiere para disminuir el índice de plasticidad del suelo y para mejorar el comportamiento portante del mismo, siendo este el objetivo principal para establecer un contenido apropiado de la mezcla (cal + suelo) para la estabilización y posterior construcción de la vía. Debido a la gran variedad de aplicaciones del suelo tratado con cal, se han desarrollado distintos métodos de diseño de las mezclas.

Por lo general, la determinación del contenido de cal se basa en analizar el efecto de distintos porcentajes de cal con respecto a una determinada propiedad de la mezcla, hay que tener en cuenta que la resistencia no aumenta linealmente con el contenido de cal de hecho, la adición excesiva de cal reduce la resistencia²⁹.

Para aplicaciones en capas de la estructura del pavimento, la propiedad que se considera normalmente para el análisis es la resistencia a la compresión inconfiada. También se estudia y analiza su estabilidad física con respecto a los cambios en la humedad ambiente. Al momento de realizar la estabilización. Según

²⁷ Dunn et al., Geotechnical Analysis. Utah State University. Canada, 1980.

²⁸ De Solminihac et. al., Op. cit., p.10.

²⁹ Eren S., Filiz, M. Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material. Construction and Building Materials. Vol. 23. 2009. p.1-8.

Bell, 1996 no es necesario añadir más del 8% de cal en peso. Estas cantidades mínimas corresponden al porcentaje de cal necesario para ser esparcidas y mezcladas uniformemente en suelos cohesivos. En la Figura 11 se muestra como es elaborado el proceso de estabilización química utilizando cal como aditivo.

Figura 11. Proceso de estabilización con cal sobre una vía terciaria.



Fuente: Recurso Web, Serviacanto.es.

3.4.2.2 Estabilización con Cemento.

Este proceso consiste en aditivar con cemento Portland un suelo previamente pulverizado, permitiendo que esta mezcla se endurezca por la hidratación del cemento. En términos generales el estabilizar un suelo con cemento, es bastante similar a la estabilización que se realiza con cal e incluso los resultados que se obtienen; porque generan los mismos materiales puzolámicos cuando reacciona la cal o el cemento con el suelo, además tanto la cal como el cemento incrementan la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, la durabilidad, y la rigidez; también cambia propiedades tales como el módulo de resiliencia y el CBR.

El cemento afecta la permeabilidad de las arenas y gravas, la cual es reducida en gran medida; mientras que en limos, arcillas y arcillas limosas, pesados muestran aumento de la permeabilidad³⁰. Para utilizar el cemento como aditivo, hay que tener en cuenta: el tipo de suelo, la cantidad de cemento, el grado de mezclado, el tiempo de curado y la densidad seca de la mezcla compactada.

El rango de suelos que pueden ser estabilizados con cemento Portland, es bastante amplio, por ejemplo: La cantidad de cemento por volumen que se requiere para la estabilización de suelo arenoso está entre el rango del 6-10%, para arcillas y limos de bajas plasticidad, es de 8 a 12 y para arcillas altamente plásticas es entre el 10-14%³¹. En todo caso, los mejores resultados en relación a los parámetros de eficiencia y economía se dan en arenas y arcillas con plasticidades bajas a medias. Cuando la plasticidad del suelo excede en un 30%, la mezcla suelo-cemento difícilmente se puede estabilizar. De manera, que si el cemento se va a usar para estabilizar suelos de alta plasticidad, primero se debe agregar la cal para reducir el índice de plasticidad, y luego agregar el cemento

³⁰ Modificado de K. Lee., Geotechnical engineering. The University of New South Wales. Australia, 1983.

³¹ P. Raj. Geotechnical engineering. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1995.

Las propiedades de los suelos estabilizados con cemento, dependen del contenido de agua, la densidad y las presiones confinantes, éstas se encuentran sujetas al porcentaje de cemento y al tiempo de curado. La figura 12 muestra como es esparcida de manera manual la mezcla de suelo-cemento, para la estabilización del suelo.

Figura 12. Estabilización química con la mezcla de suelo-cemento.



Fuente: Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC).

3.4.2.3 Estabilización con Asfalto.

La estabilización de suelos con asfalto tiene como objetivos principales impermeabilizar los suelos planos de sub-rasante, mejorar materiales poco aptos, aportar estructura lo que permite una reducción en el espesor de las capas superiores, reducción del polvo.

El mecanismo de esta estabilización de la mezcla suelo-asfalto, difiere de la estabilización de la mezcla suelo-cemento o suelo-cal, en el comportamiento de la reacción durante el proceso de estabilización y formación de productos cementantes. El asfalto es un material orgánico, visco elástico y poco soluble en agua; de acuerdo a las propiedades químicas, él no puede reaccionar químicamente con el suelo, como suele suceder en el caso de la mezcla suelo-cal o suelo-cemento, debido a que la cal y el cemento son materiales inorgánicos solubles y reactivos en medio acuoso; en el caso del asfalto, como es un material orgánico insoluble en medio acuoso, este simplemente se localiza físicamente entorno a las partículas del suelo, mejorando de esta manera la impermeabilización del suelo.

Para algunos suelos finos susceptibles al agua, esta metodología mejora sus propiedades mecánicas, tales como: resistencia al corte, compresión, tensión, flexión y módulo elástico.

En materiales no cohesivos, tales como: arenas y gravas, se desarrollan mecanismos como la adherencia, que corresponde a la unión de las partículas de agregado con asfalto, este fenómeno aumenta la resistencia al corte, debido a que le confiere cohesión.

3.4.2.4 Estabilización con Sales.

Las sales son compuestos formados entre cationes y aniones, y surgen como producto de la reacción química entre una base y un ácido. Las sales normales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) son sales neutralizadas, es decir no tienen exceso de iones de hidrógeno (H^+), ni básicos de hidróxilo. Estas han sido estudiadas con diversos fines, sin embargo la economía y disponibilidad han hecho que solo se utilicen algunas, siendo las más utilizadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.

a. Cloruro de Calcio (CaCl_2)

Se obtiene de manera natural en arroyos y pozos naturales, también se obtiene de procesos industriales. La acción estabilizante del cloruro de calcio disminuye la fuerza de repulsión entre las arcillas, hay autores que aseguran que la capa de agua que rodea las partículas se ve eléctricamente reforzada con la adición de la sal³², incrementando la cohesión aparente.

El porcentaje de sal que se adiciona se encuentra en el intervalo de 0.5 al 3%. Entre las características del cloruro de calcio se encuentra que ayuda a mantener una humedad constante, dada su facilidad al ser lavada. Las limitantes más importantes a tener en cuenta son la humedad relativa del 30%, de minerales que pasen la malla 200 y que reaccionen favorablemente con la sal³³, nivel freático.

³² Garnica et al., Op. Cit. p.22.

³³ Ibíd. Op. Cit. p.23.

b. Cloruro de Sodio (NaCl).

Agregar el cloruro de sodio para la estabilización de suelos es un método de debate, ya que los cambios registrados no siempre son favorables o iguales, por lo que no se debe generalizar.

Esta sal se produce a partir de diversos métodos, el más convencional es a partir del calor evaporar el agua, para obtener la sal, seguido de la extracción directa en minas de sal. En teoría la adición de sal hace la arcilla se estructure en una forma dispersa, produciéndose así un acercamiento entre las partículas³⁴. El uso de este método es bastante útil para países con problemas de congelamiento. En general este método de estabilización es relativamente nuevo y hay que tener múltiples consideraciones para su uso y práctica.

³⁴ Garnica et al., Op. Cit. p.24.

4. METODOLOGÍA

El presente trabajo se enfoca a evaluar la aplicación del residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador químico de suelos arcillosos de comportamiento plástico, provenientes de vías terciarias del departamento de Santander. Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se implementa la metodología descrita a continuación.

4.1. ETAPA i – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La estabilización química de suelos ha sido ampliamente estudiada, lo que hace posible encontrar un gran volumen bibliográfico. Dicha información fue compilada y consultada en diferentes bases de datos como ScienceDirect, la red Elsevier, en conjunto con la plataforma bibliográfica de la Universidad Industrial de Santander. Durante ésta búsqueda se encontraron libros, revistas electrónicas, proyectos de grado y material de circulación libre en Internet. Una vez recolectada la información se elaboró una revisión bibliográfica con el fin de filtrar el contenido relevante. Esta consulta bibliográfica permitió fortalecer el conocimiento del tema, despejar dudas que se presentaron durante la ejecución del proyecto y el análisis de los resultados obtenidos. Esta etapa es de carácter continuo y se llevará a cabo durante todo el proceso hasta la finalización del proyecto.

4.2. ETAPA ii – FASE CAMPO Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS A ESTABILIZAR.

En esta etapa se definieron los suelos a estabilizar, de manera seguida se programó una visita a dos vías terciarias del departamento de Santander, localizadas en los municipios de Lebrija sobre el sector el Portugal y en Floridablanca sobre la vía que conduce a la Turena. Donde se realizaron apiques de 80 cm de profundo por 50 cm de ancho para la extracción del suelo.

Una vez tomadas las muestras fueron transportadas a los laboratorios de Materiales anexo a la escuela de Ingeniería Civil, Laboratorio de difracción de rayos X (DRX), y el laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) perteneciente al edificio de investigación del Parque Tecnológico de Guatiguará Centro de la Universidad Industrial de Santander para su posterior caracterización física y química.

La lutita compacta fue recolectada en los botaderos de la mina "El Diviso" localizada en la Mesa de Los Santos en el departamento de Santander, por Pacheco y Rincón, en el año 2013.

4.2.1 Caracterización física de los Suelos a estabilizar.

Los suelos provenientes de las vías terciarias, se denominaron como suelo A, el correspondiente al suelo del municipio de Floridablanca y suelo B, el recolectado en el municipio de Lebrija.

Las muestras de suelos en el laboratorio de caracterización de materiales adjunto a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander se les practicaron los siguientes ensayos: Humedad natural (INV E-122), granulometría por tamizado hasta el tamiz n°200 (INV E-123), límites de Atterberg (INV E-125) (*Ver anexos A y C*), Compactación o Proctor estándar y modificado (INV E-142), CBR (INV E-148) a cada una de las muestras en su estado natural (*Ver anexos E y G*).

Estas pruebas se llevaron a cabo siguiendo las normas de ensayo para carreteras propuestas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), adoptadas por el ministerio de transporte de la resolución número 3290 del 15 de agosto de 2007.

4.2.2 Caracterización química de los suelos a estabilizar.

La caracterización química de los suelos A y B se elaboró a partir de métodos analíticos de difracción de rayos X (DRX), donde se identificaron y cuantificaron las fases cristalinas arcillosas; de igual manera se utilizó el microscopio electrónico de barrido (SEM) para obtener imágenes de las partículas contenidas en los suelos antes y después de la estabilización. Las muestras analizadas fueron tamizadas por la malla N°40, consecutivamente y se pulverizaron en un mortero de ágata a un tamaño de 38 μm (400 mesh).

En el caso de Difracción de rayos X, el espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría Da Vinci.

4.3. ETAPA iii – FASE EXPERIMENTAL

La etapa experimental, se encuentra dividida en dos partes, la primera corresponde al diseño experimental donde se establecieron las condiciones del experimento, y la segunda a la ejecución experimental.

4.3.1 Diseño Experimental

El experimento se llevó a cabo dos matrices de diseño factorial de 2^3 (Keuhl, 2001), donde se establecieron condiciones fijas con las cuales se espera determinar la variación de las reacciones puzolánicas.

Las condiciones que se tuvieron en cuenta para la elaboración de las matrices son:

a- Tiempo de curado del suelo aditivado, durante los días 7 y 14, bajo lutita compacta, y lutita compacta más cemento.

b- Los reactivos: Lutita compacta, cemento, suelo A (Qfe) y suelo B (Kip). El cual se identifican como los factores que intervienen en el diseño. Los niveles establecidos de las concentraciones de estos, son el valor mínimo 0,5% y el valor máximo 1,0%. Este porcentaje se estableció teniendo en cuenta el comportamiento físico de las nano-partículas, el cual es influenciada por el tamaño de la partícula y el área superficial.

Finalmente, teniendo en cuenta las condiciones a y b se diseñaron las matrices consignadas en las tablas 8 y 9.

Tabla 8 Matriz del Suelo A-Qfe

SUELO A- Qfe		
Factores	Mínimo	Máximo
Lutita Compacta	0.5	1
Cemento	0.5	1
Tiempo	7	14

Tabla 9 Matriz del Suelo B- Kip

SUELO B		
Factores	Mínimo	Máximo
Lutita Compacta	0,5	1
Cemento	0,5	1
Tiempo	7	14

Con los datos consignados en la tablas 8 y 9 se obtuvieron las siguientes matrices de diseño experimental 2^3 .

Tabla 10 Matriz de diseño experimental 2^3 con las múltiples combinaciones del Suelo A-Qfe.

Combinaciones suelo A-Qfe			
Combinación	Lutita compacta %	Cemento %	Tiempo
1	0.5	0.5	7
2	0.5	1	7
3	1	0.5	7
4	1	1	7
5	0.5	0.5	14
6	0.5	1	14
7	1	0.5	14
8	1	1	14

Tabla 11 Matriz de diseño experimental 2^3 con las múltiples combinaciones del Suelo B-Kip.

Combinaciones suelo B- Kip			
combinación	Lutita compacta %	Cemento %	Tiempo
1	0.5	0.5	7
2	0.5	1	7
3	1	0.5	7
4	1	1	7
5	0.5	0.5	14
6	0.5	1	14
7	1	0.5	14
8	1	1	14

Con el diseño experimental se evaluaron los cambios de la capacidad portante e índice de plasticidad a partir de diagramas de barras. Con los resultados se puede

conocer las condiciones más óptimas para la estabilización química del suelo utilizando Lutita Compacta.

4.3.2 Ejecución experimental.

Con las matrices experimentales para el suelo A y B, se pesaron 300 gr de suelo seco, los cuales fueron aditivados con la lutita compacta y el cemento con las concentraciones para cada combinación. Una vez hecha la aditivación, se procedió a agregar la cantidad de agua en gramos equivalente a su humedad natural, mezclando cada uno de los elementos hasta obtener aspecto homogéneo. Posteriormente se depositaron en frascos de vidrio y se dejaron en curado a temperatura ambiente durante 7 y 14 días respectivamente. .

4.4. ETAPA iv– EVALUACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA.

Al pasar el tiempo de curado de 7 y 14 días, a cada una de las muestras se le determinó el índice de plasticidad para cada combinación establecida en el diseño experimental (*Ver anexos B y D*), de esta manera se establecieron las variaciones físicas de cada uno de los suelos con respecto a su condición inicial.

Las muestras que disminuyeron significativamente el índice de plasticidad con respecto a las condiciones iniciales se seleccionaron para ser caracterizadas petrográfica y químicamente con los métodos de DRX y SEM.

De igual manera se evaluó el comportamiento físico a través de un ensayo de próctor modificado y de CBR a la muestra con mayor disminución del índice de plasticidad la cual corresponde a la combinación número 4 (*Ver anexos F y H*), para los suelos A y B.

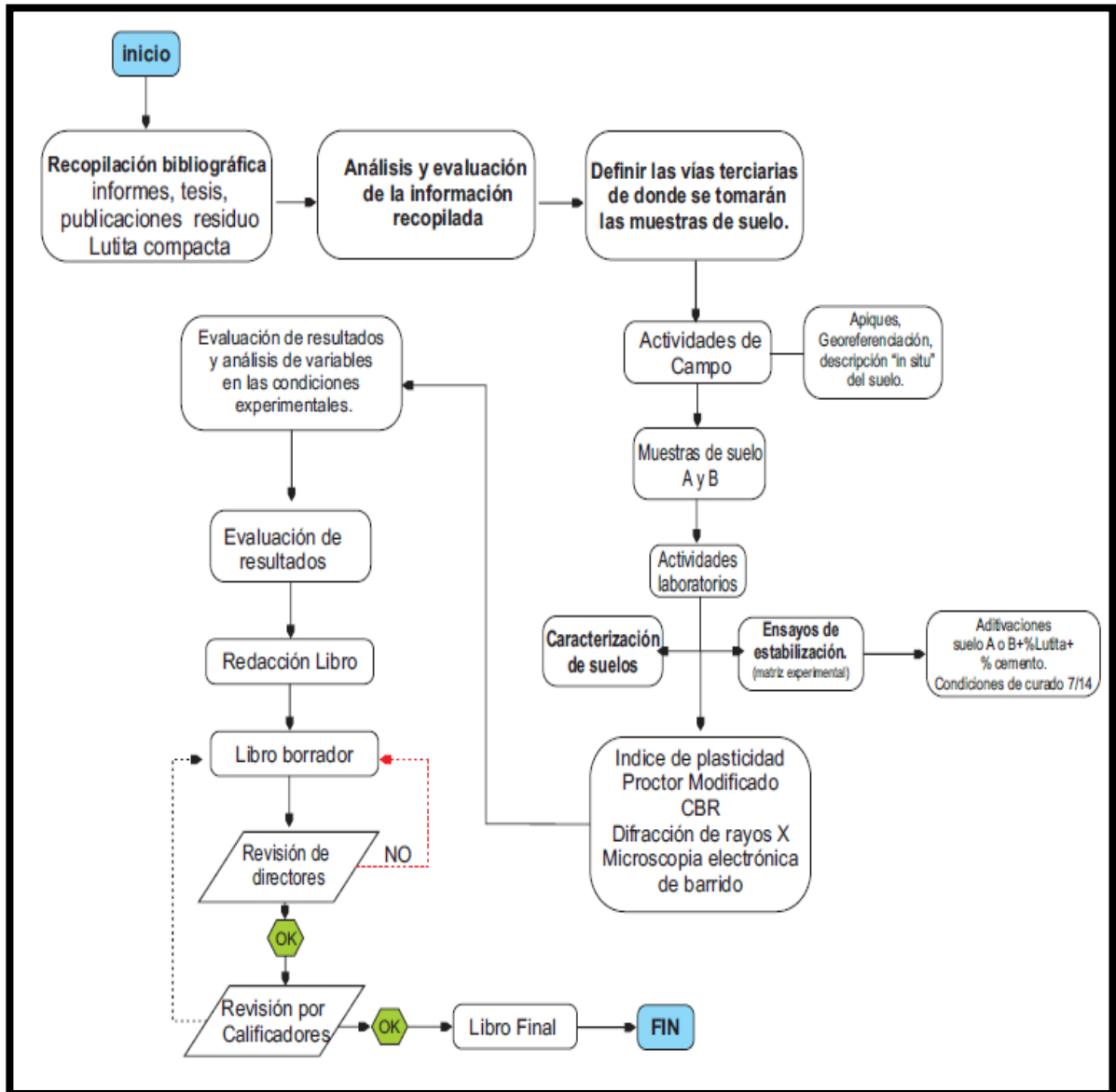
4.5. ETAPA v– RESULTADOS E INFORME FINAL.

Esta fase comprende el análisis de los resultados de los laboratorios y ensayos de la etapa 4, donde se reconocieron los cambios mineralógicos, físicos y químicos

que sufrieron los suelos con diferentes índices de plasticidad, para así determinar la capacidad estabilizadora de la lutita compacta.

Con lo anterior procede a elaborar el libro final, donde quedarán plasmados los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

Figura 13 Flujodiagrama De Procesos Y Actividades Para Llevar A Cabo Aplicación Del Residuo De Minería De Yeso (Lutita) Como Estabilizador De Suelos Arcillosos En Santander.



5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA SUELO ORIGINAL

En el presente capítulo se presenta la localización geográfica de los suelos A y B, además se elabora una descripción física teniendo en cuenta la norma I.N.V.E-102-07 para la descripción e identificación de los suelos donde se analizan los parámetros de angulosidad, forma, color (Carta de color Munsell), humedad consistencia, entre otros; de manera seguida se clasifican los suelos con el S.U.C.S y se exponen los resultados de las características geotécnicas los mismos.

5.1.1 Suelo A- Qfe (Flujo de Escombros)

Localización: Material obtenido al margen izquierda del carreteable que conduce hacia la Turena, al noreste del casco urbano del municipio de Floridablanca en las coordenadas Lat: 7°3'31.44"N; Long: 73° 4'32.06"O con una altura de 980 m.s.n.m. (Ver Figura 14).

Figura 14. Localización del Suelo A-Qfe.



Fuente: Tomado de Google earth 2014.

Descripción: Material areno arcilloso de color 10YR 6/6 naranja amarillento oscuro como se muestra en la figura 15, con una consistencia parcialmente homogénea de humedad media a baja al tacto, con plasticidad media. Se compone predominantemente por partículas tamaño arenas y arcillas, contiene una fracción menor de gravas finas a gruesas. El tamaño máximo de los fragmentos gravosos es de 7cm con forma no esféricas subangulares de litologías ígneas y metamórficas posiblemente provenientes del macizo de Santander, este suelo corresponde a un suelo transportado de tipo Coluvial asociado a los depósitos cuaternarios de flujos de escombros (Qfe).

Figura 15 Muestra de suelo A (Qfe) sin aditivar.



Con el fin de clasificar el suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (S.U.C.S), se realizaron los ensayos de granulometría y límites de Atterberg resultando de ellos un porcentaje de finos (pasa tamiz N°200) del 46.35%, arenas 51.35% y gravas del 2.3%.

El límite líquido fue de 34.60%, límite plástico de 22.65%, lo que representa un índice de plasticidad de 11.95%. Al ubicar estos datos a la carta de Casagrande se concluye que el suelo corresponde a una arena arcillosa (SC) (*Ver anexo A*).

Del ensayo de Próctor Modificado se obtuvieron densidades máximas secas de 1gr/cm^3 y 1950 k/m^3 , con humedad de compactación en promedio de 9%; de la prueba de California Bearing Ratio (C.B.R) se observó que el suelo presenta un mayor porcentaje de expansión a los 55 golpes por capa, al ser inmerso en agua durante un periodo de 4 días, obteniendo un porcentaje de expansión de 1.74%. El número de C.B.R es de 2, 5, 9 para los 12, 26 y 55 golpes (*Ver anexo E*). Según los datos obtenidos a partir del C.B.R se concluye el suelo A es un suelo de calidad media a mala.

5.1.2 Suelo B- Kip (Suelo Residual Formación Paja)

Localización: Margen izquierdo del carretable que conduce al Portugal con la vía Barranca- Bucaramanga en municipio de Lebrija, Santander en las coordenadas: Lat $7^{\circ}9'30.54''$; Long: $73^{\circ}17'2.23''$ a 1098 m.s.n.m (*ver figura 16*).

Figura 16 Localización del suelo B-Kip.



Fuente: Tomado de Google Earth, 2014.

Descripción: Se elabora un apique de 70cmx80cm de profundo ilustrado en la figura 17, exhibiendo el perfil de suelo donde se logra observar un leve desarrollo de material orgánico aproximadamente de 20cm de espesor. El suelo es un material arcilloso de color 5Y 5/2 gris oliva claro (Ver figura 18), se compone de fragmentos no esféricos angulares de lodolitas negras alteradas, embebidos en una matriz arcillosa producto de la alteración de las mismas. Su naturaleza es homogénea, de consistencia blanda con humedad y plasticidad alta al tacto. Este material corresponde a un suelo saprolítico de la formación Paja.

Figura 17 Perfil del suelo Saprolítico de la Formación Paja mostrando desarrollo de suelo orgánico.

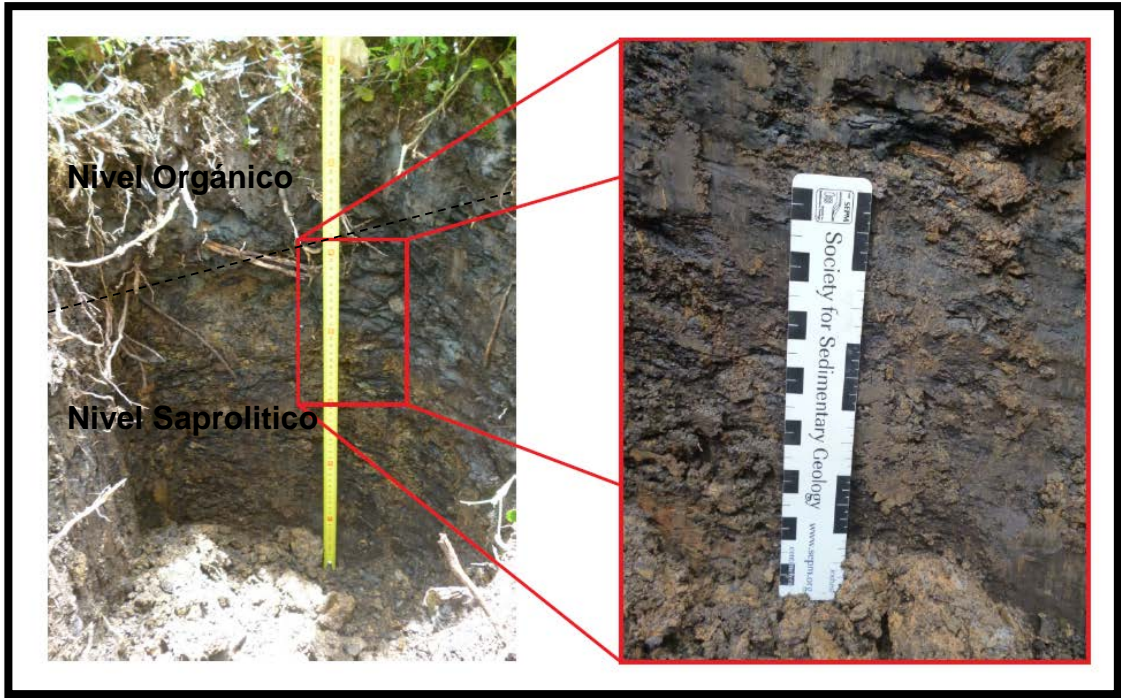


Figura 18 Muestra de suelo B (Kip) sin aditivar.



Con el fin de clasificar el suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (S.U.C.S), se realizaron los ensayos de granulometría y límites de Atterberg resultando de ellos un porcentaje de finos (pasa tamiz N°200) del 97.89%, arenas 2.09% y gravas del 0.03%.

El límite líquido fue de 56.36%, límite plástico de 39.97%, lo que representa un índice de plasticidad de 16.40%. Al ubicar estos datos a la carta de Casagrande se concluye que el suelo corresponde a una un limo elástico arenoso (CH) (*Ver anexo C*).

Del ensayo de Próctor Modificado se obtuvo una densidad máxima seca de 1900 gr/cm³, con humedad de compactación en promedio de 15.5%; de la prueba de California Bearing Ratio (C.B.R) se observó que el suelo presenta un mayor porcentaje de expansión a los 55 golpes por capa, al ser inmerso en agua durante un periodo de 4 días, obteniendo un porcentaje de expansión de 5.6%. El número de C.B.R es de 2, 3, 5 para los 12, 26 y 55 golpes (*Ver anexo G*). Según los datos obtenidos a partir del C.B.R se concluye el suelo B es un suelo de calidad mala.

5.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS SUELOS ORIGINALES.

En el presente capítulo se muestran los resultados de la caracterización química de los suelos A y B, a partir de las técnicas de difracción de Rayos X y microscopía electrónica de barrido (SEM), llevados a cabo los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander, Sede Guatiguará. A continuación se hace una breve descripción de las condiciones que se tuvieron en cuenta para la elaboración de cada una de las pruebas.

- **Difracción de Rayos X.**

Para llevar a cabo la caracterización química se pulverizaron las muestras en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 μm (400 mesh). Posteriormente el espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. Finalmente la prueba se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las condiciones expresadas en la Tabla 12:

Tabla 12 Condiciones establecidas para la elaboración de DRX.

Voltaje	40(kV)
Corriente	30(mA)
Rendija de Divergencia	0.6mm
Rendijas Soller Primario	2.5°
Muestreo	0.01526° 2theta
Rango de Medición	3.5-70° 2theta
Radiación	CuK1
Filtro	Níquel
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	A pasos
Tiempo de muestreo	0.4 segundos

Fuente: Laboratorio Difracción de Rayos X, UIS Guatiguará, 2014.

Los análisis cualitativos y cuantitativos de las muestras se llevaron de la siguiente manera.

Análisis Cualitativo

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (*Aluminum oxide, Corundum, α -phase*) correspondiente al 20%.

- **Microscopia electrónica de Barrido (SEM)**

Este análisis se realiza con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido Quanta 650 FEG ambiental (ESEM), el cual es un equipo versátil que proporciona imágenes de alta resolución a alto vacío, bajo vacío y vacío extendido (ambiental) para la caracterización de muestras conductoras y no conductoras, la realización de experimento in-situ y el análisis químico mediante la técnica EDS (análisis micrométrico donde el volumen de interacción puede tomar más de una partícula). La combinación de estas técnicas permite el estudio de todo tipo de materiales sólidos incluyendo muestras biológicas, materiales metálicas, cerámicos, y polvos, entre otros.

El microscopio Quanta FEG 650 Utiliza la tecnología de emisión de campo (Schottky Field Emission Gun) para la generación del haz de electrones, que cuenta con una baja dispersión angular, produciendo así imágenes de mayor resolución. Mediante la sonda EDAX serie SDD Apollo X, es posible identificar los elementos presentes en la muestra evaluando los porcentajes en peso atómico y número atómico y su distribución mediante puntos de interés, Perfiles o mapas.

5.2.1 Caracterización Química del Suelo A-Qfe

El suelo de tipo coluvial asociado a los depósitos cuaternarios de Flujos de escombros (Qfe), se compone de cinco fases cristalinas de 68.3% de la muestra junto con un 31.7% de amorfos y otros.

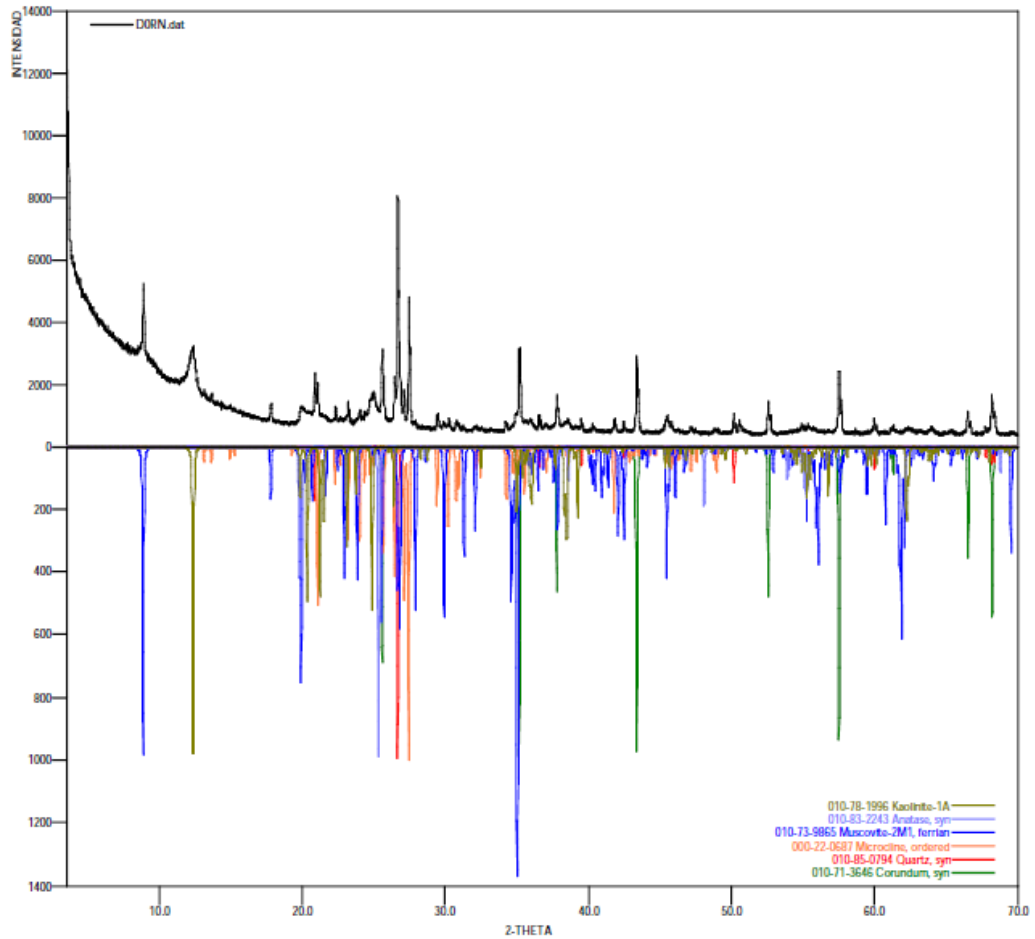
En la tabla 13 se relacionan los minerales constituyentes que componen las cinco fases cristalinas, predominando el cuarzo con un 18.0%, seguido por la microclina 14.0%, Moscovita 6.3% y Caolinita 30% también aparece una fase de Anatasa no cuantificable (N.C).

Tabla 13 Resultados Cuantitativo DRX para el suelo A-Qfe.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo	18.0 % (0.3)
	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$	Microclina	14.0 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	6.3 % (0.1)
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	30.0 % (0.3)
	Ti O_2	Anatasa	N.C
Total Cristalino			68.3 %
Amorfos y otros			31.7 %

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X, UIS- Guatiguará.

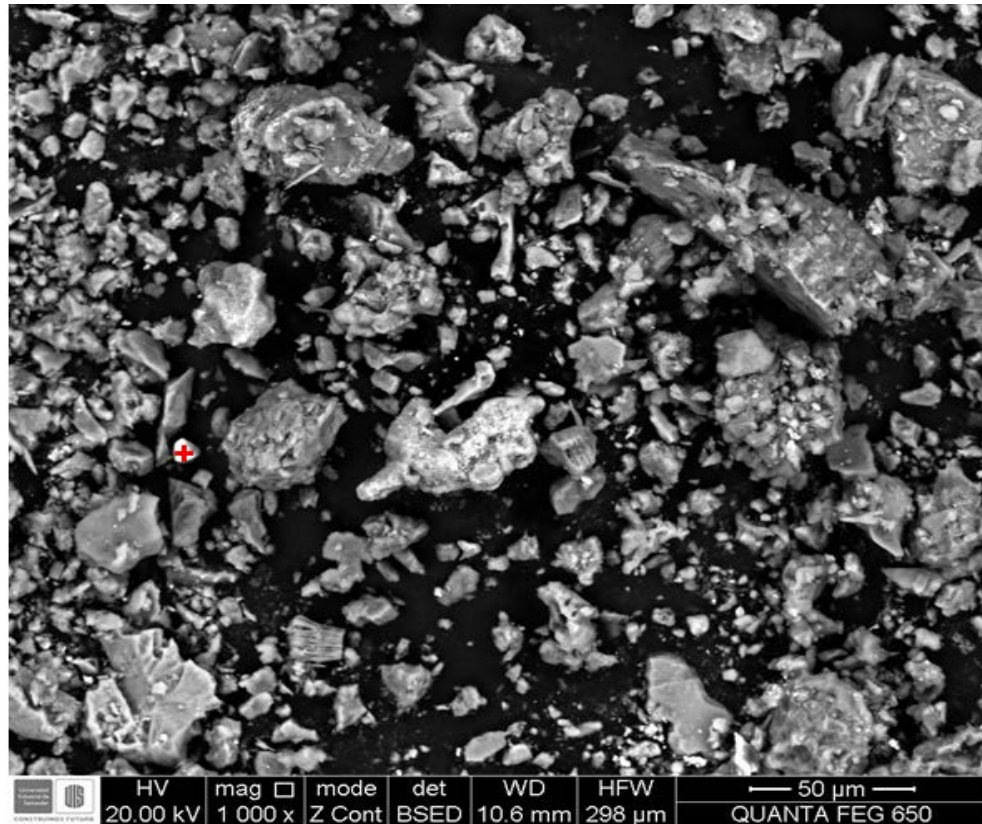
Figura 19 Difractograma de la muestra del suelo A-Qfe.



Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. UIS-Guatiguará.

Los resultados del SEM muestran en la figura 20 una imagen de alta resolución de la muestra de suelo Qfe donde se puede observar la geometría y distribución de las partículas, sin embargo dado que la muestra se dio pulverizada el resultado puede estar sujeto a ruido generado por partículas vecinas. Para elaborar este análisis se realizaron 3 enfoques a la muestra del suelo original. Un primer y segundo enfoque para determinar el porcentaje y elemento atómico constituyente de un punto en específico y un tercer enfoque para una región.

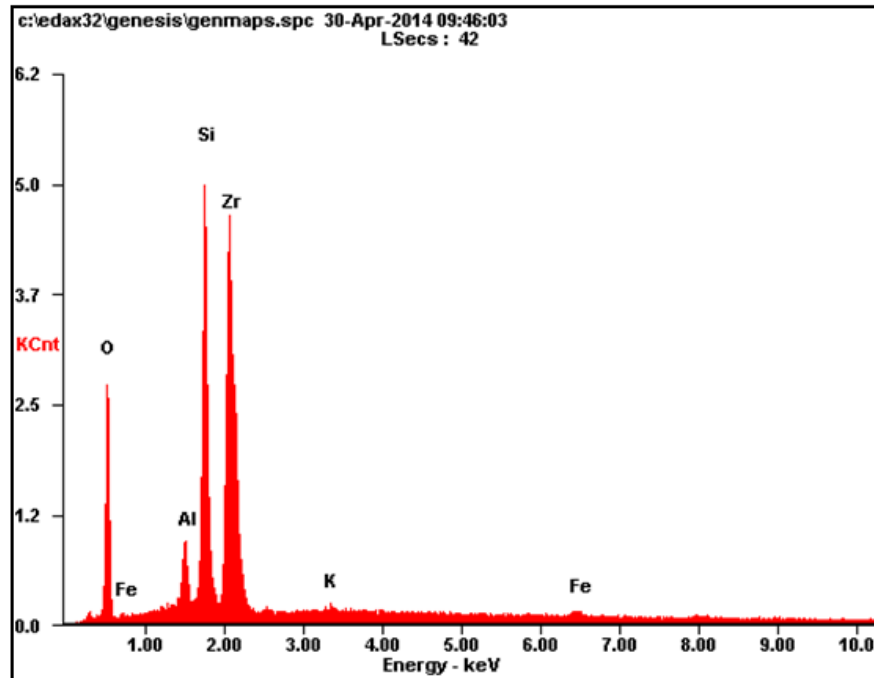
Figura 20 Imagen del SEM EDS realizado a la muestra de suelo A-Qfe (NF-Qfe).
Enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS-Guatiguará.

La figura 20 muestra un primer enfoque en la muestra del suelo A-Qfe, donde en general la geometría es muy irregular salvo algunas partículas levemente laminares posiblemente asociado a la caolinita presente. En la imagen se destaca un brillo sobresaliente sobre algunas partículas de la muestra, donde se hace un primer enfoque registrando el espectro presente en la figura 21.

Figura 21 Espectrograma de la composición química del suelo A-Qfe en el Enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS-Guatiguará

Tabla 14 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 1.

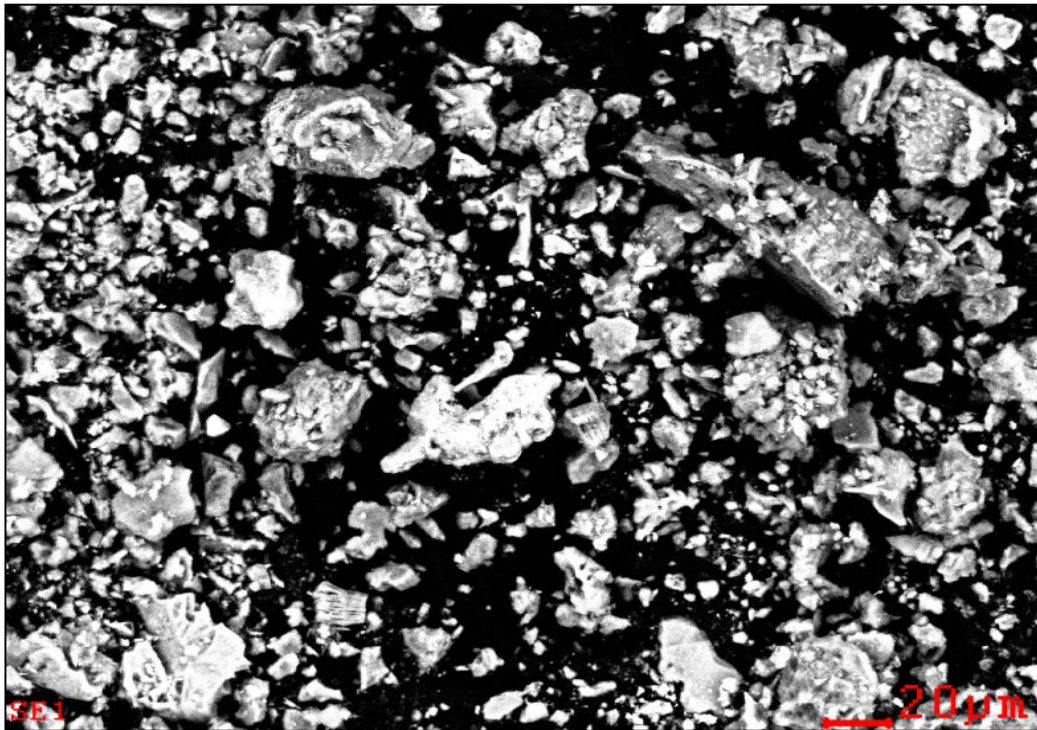
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
OK	32.35	61.31
AlK	2.76	3.1
SiK	18.09	19.53
ZrL	44.88	14.92
KK	0.41	0.32
FeK	1.52	0.83
Matrix	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS-Guatiguará.

En el espectrograma de la figura 21 se relaciona con los valores de la tabla 14. En el porcentaje en peso sobresalen los valores de Sílice (18.09 Wt%) y Zircón (44.88 Wt) en el nivel K, los cuales son los picos que más se destacan en el espectrograma, los resultados apuntan a que el enfoque en este punto corresponde a un zircón.

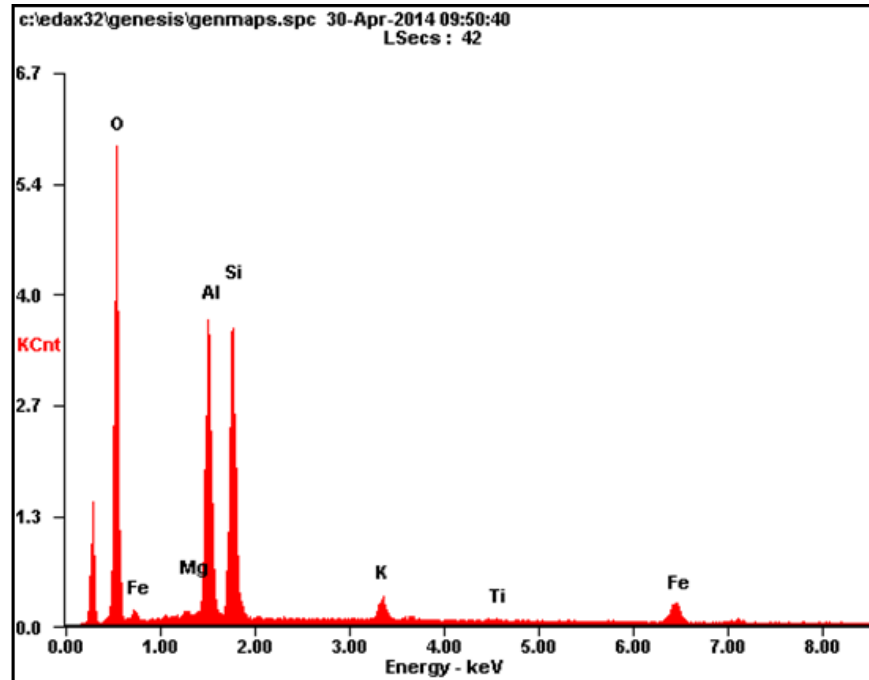
El enfoque 3 se hace a una región, para tener los valores de cada uno de los elementos constituyentes, la figura 22 se observa la imagen SEM hecha a 20 μ m.

Figura 22 Imagen SEM EDS con enfoque en una región de elementos en el que se realiza el examen de composición para el suelo A-Qfe.



Fuente: Laboratorio de SEM, UIS-Guatiguará.

Figura 23 Espectrograma de la composición química de una región del suelo A-Qfe en el enfoque 3.



Fuente: Laboratorio SEM, UIS-Guatiguará

Tabla 15 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 3.

Element	Wt%	At%
OK	48	63.19
MgK	0.42	0.37
AlK	19.13	14.94
SiK	23.83	17.87
KK	2.24	1.2
TiK	0.33	0.15
FeK	6.05	2.28
Matrix	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM, UIS-Guatiguará

Composicionalmente esta región es congruente con los datos registrados en la tabla 13, ya que sus principales elementos para esta región corresponden aluminosilicatos (42.96%Wt), óxidos (48%Wt), en menor proporción elementos de hierro (6.05% Wt), potasio (2.24 %Wt) y titanio (0.33%Wt). Este espectro es probablemente generado por la moscovita presente en la muestra o por la caolinita.

5.2.2 Caracterización Química Suelo B-KIP

El suelo saprolítico asociado a la formación paja (KIP), se compone de cinco fases cristalinas correspondiente a un 40.1% de la muestra junto con un 59.9% de amorfos y otros, completando así el 100%.

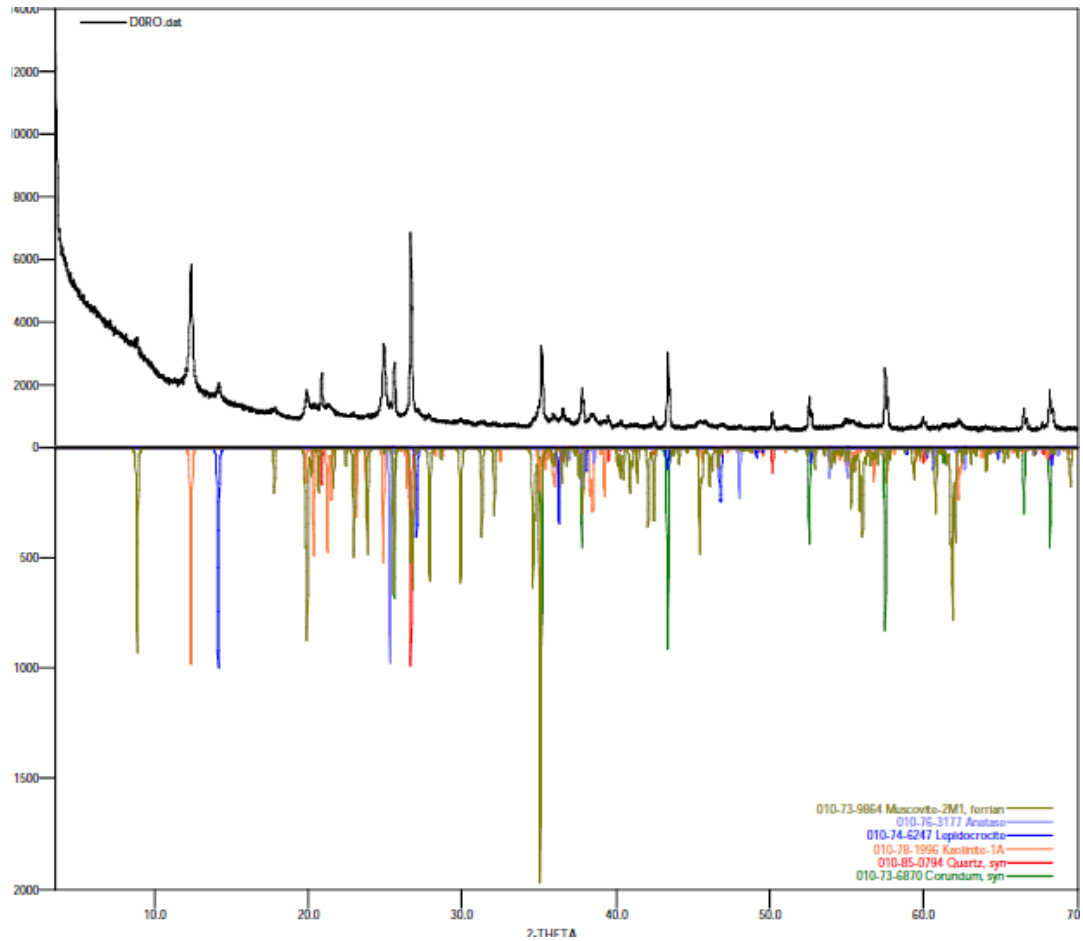
En la tabla 16 se relacionan los minerales constituyentes que de las cinco fases cristalinas, donde predomina la caolinita con un 17.5%, seguido del cuarzo con un 12.5, moscovita con un 7.8% y una la fase de anatasa no cuantificable (N.C), la cual puede estar incluida en el porcentaje de amorfos y otros. En la figura 24 se observan cada uno de los picos de las fases minerales que aparecieron en la muestra de suelo B-Kip.

Tabla 16 Resultados Cuantitativo DRX para el suelo B-Kip.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo	12.5 % (0.2)
	Fe O (O H)	Lepidocrocita	2.3 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	7.8 % (0.3)
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	17.5 % (0.4)
	Ti O_2	Anatasa	N.C
Total Cristalino			40.1 %
Amorfos y otros			59.9 %

Fuente: Laboratorio Difracción de Rayos X. UIS-Guatiguará.

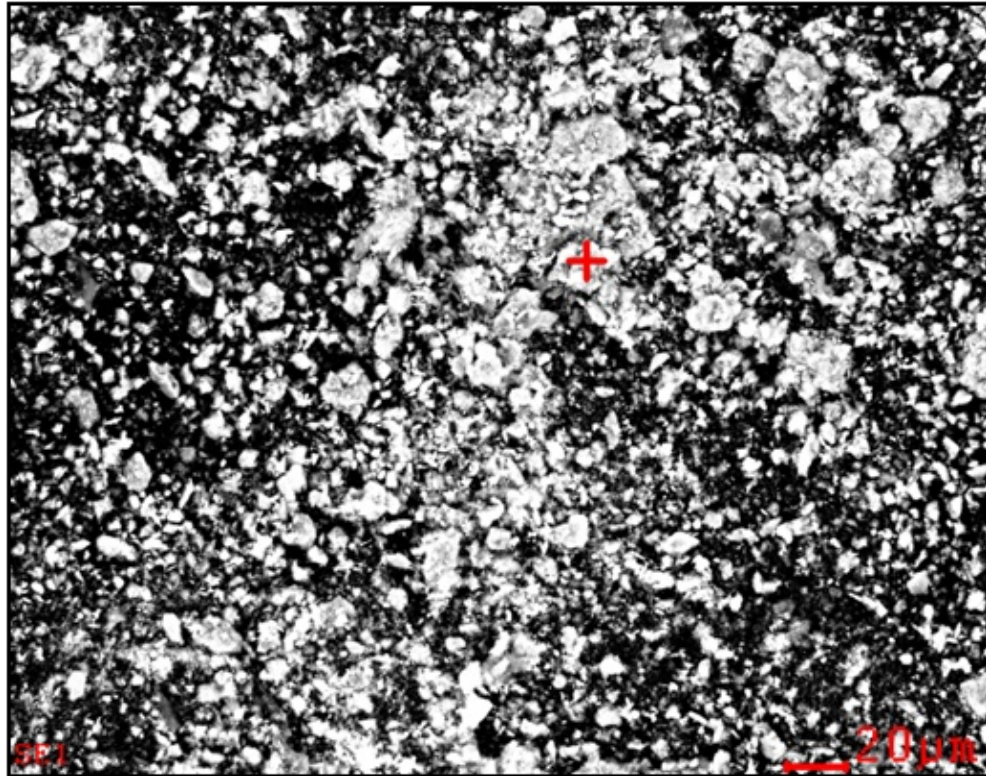
Figura 24 Difractograma de la muestra del suelo B-Kip.



Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. UIS-Guatiguará.

La imagen SEM EDS de la muestra de suelo B-Kip se ilustra en la figura 25. Para este análisis se elaboraron dos enfoques, uno con el fin de determinar los porcentajes y elementos atómicos constituyentes de un punto en específico y el segundo para una región.

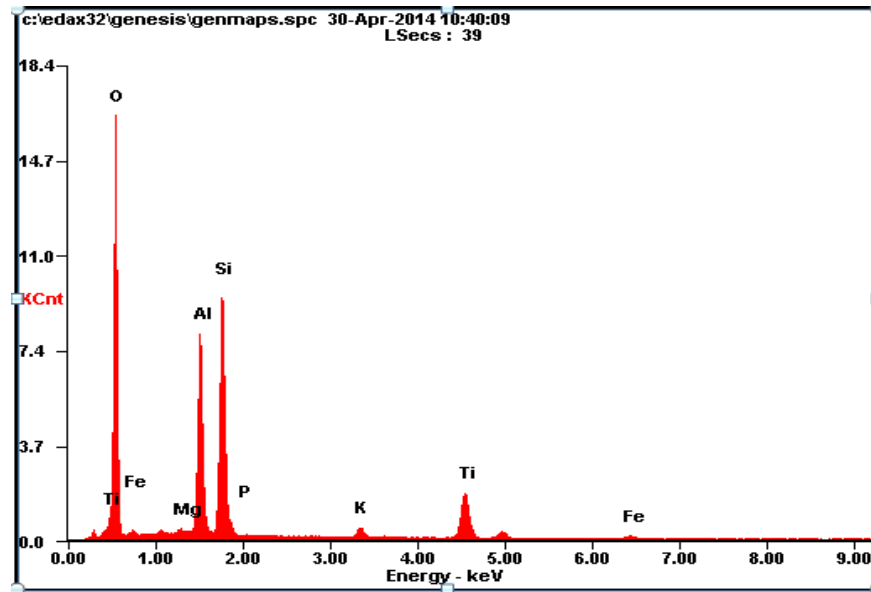
Figura 25 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra de suelo B- Kip (NF-Kip). Enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS-Guatiguará.

Esta imagen muestra partículas irregulares con tamaños que varían desde $2\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$. El enfoque 1 se ilustra en la imagen con un signo más (+) de donde se obtuvieron los porcentajes elementales constituyentes reflejados en la tabla 17 en la cual predominan los óxidos con un 55.44%, sílice 19.94%, aluminio 14.14%, titanio 7.96% y hierro con un 1.05%. Estos valores se relacionan con la figura 26 la cual corresponde al espectrograma de la composición química del suelo B-Kip, el cual puede ser asociado con un espectro de biotita rica en hierro.

Figura 26 Espectrograma de la composición química de una región del suelo B-Kip en el enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS-Guatiguará.

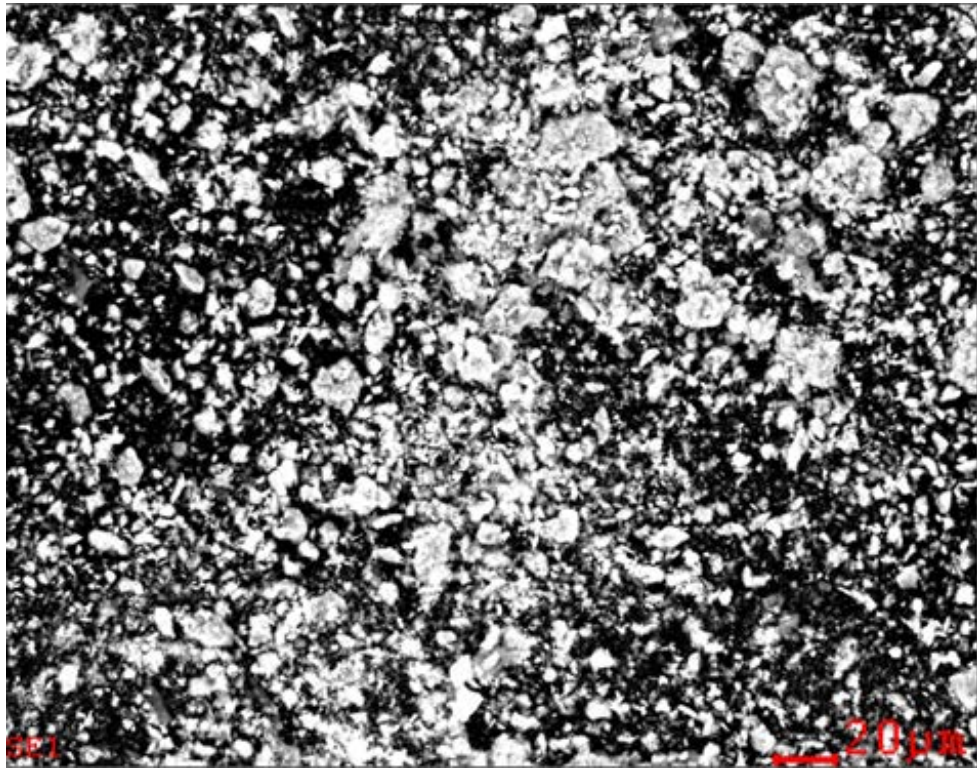
Tabla 17 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 1 del suelo B-Kip.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	55.44	70.3
<i>MgK</i>	0.43	0.36
<i>AlK</i>	14.14	10.63
<i>SiK</i>	19.94	14.41
<i>PK</i>	0.11	0.07
<i>KK</i>	0.93	0.48
<i>TiK</i>	7.96	3.37
<i>FeK</i>	1.05	0.38
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM. UIS-Guatiguará.

Los resultados del enfoque 2 se hace sobre una región de elementos que se muestra en la figura 27. Los elementos de mayor proporción en porcentaje de peso atómico son nuevamente los óxidos con un 44.83 %, seguidos de calcio con un 24.47%, sílice 15.22% y aluminio con un 10.5% (Ver tabla 18). La figura 28 muestra los picos de los elementos sobresalientes en ésta región, siendo coherente con los resultados de DRX.

Figura 27 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra de suelo B- Kip (NF-Kip). Enfoque 2.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS-Guatiguará.

Figura 28 Espectrograma de la composición química de una región del suelo B-Kip en el enfoque 2.

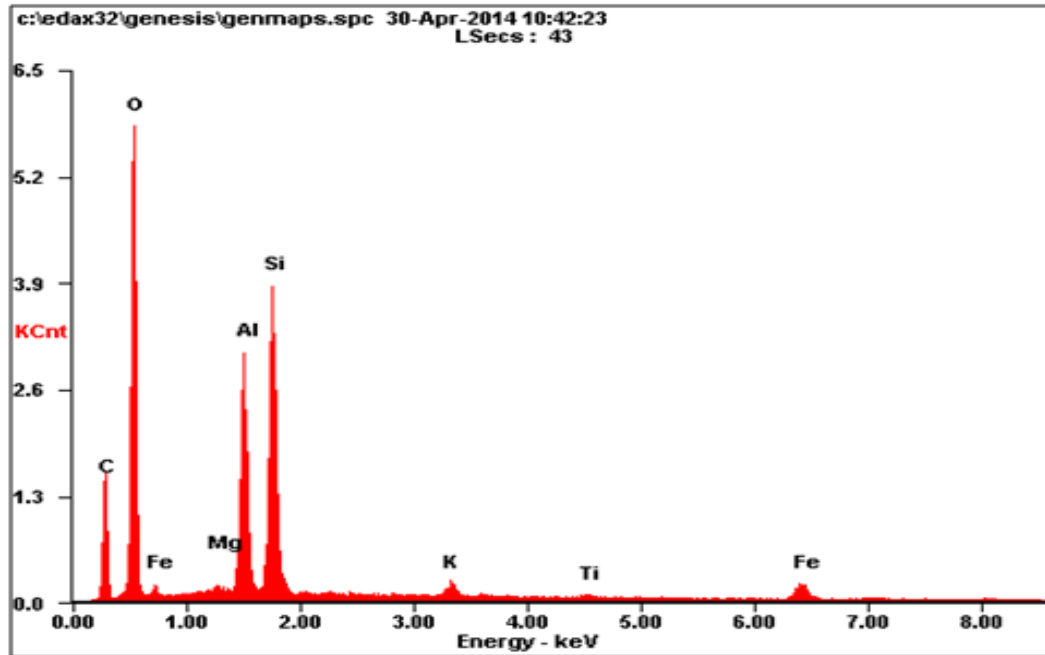


Tabla 18 Porcentaje atómico y en peso de cada elemento constituyente para el enfoque 2 del suelo B-Kip.

Element	Wt%	At%
CK	24.47	34.69
OK	44.83	47.7
MgK	0.28	0.2
AlK	10.5	6.63
SiK	15.22	9.22
KK	0.89	0.39
TiK	0.3	0.11
FeK	3.5	1.07
Matrix	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM. UIS-Guatiguará.

5.3. ADITIVACIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRAS.

El presente capítulo se describe el proceso al que fueron sometidos los suelos A-Qfe y B-Kip con el fin de simular una estabilización en terreno. Para identificar la combinación más adecuada fue necesario establecer los contenidos mínimos y máximos de cemento y lutita mencionados en la tabla 8 y 9.

En general para cada suelo se elaboraron las combinaciones establecidas en el diseño experimental de la metodología, adicionalmente se prepararon dos muestras a las cuales se les añadió únicamente la lutita para evaluar el comportamiento plástico de los suelos sin ayuda del cemento Portland.

Inicialmente se tomó una cantidad de 300g de suelo que pasara el tamiz N° 40 (0.425 mm) y fueron dispuestos en taras con capacidad de 1000 g. Seguido a esto a cada tara se le añadió el peso en gramos correspondiente al porcentaje establecido en las tablas 10 y 11. Estas concentraciones (0.5 y 1%) en gramos equivalen a los valores expuestos en la tabla 19.

Tabla 19 Proporción en gramos para los Suelos A-Qfe y B-Kip en cada combinación.

Proporción Lutita+Cemento		
combinación	Lutita compacta (g)	Cemento (g)
1	1.5	1.5
2	1.5	3
3	3	1.5
4	3	3

Cada muestra fue mezclada de manera homogénea hasta que no fuese evidente ningún resto de lutita o cemento. La mezcla uniforme se dividió en dos para añadir la cantidad de agua equivalente a la humedad natural de cada suelo. Esta parte es muy importante ya que toda la muestra debe quedar humedecida para dar

lugar a las reacciones de intercambio catiónico, y así condicionar un ambiente adecuado. Las muestras fueron envasadas en frascos de vidrio y dispuestas a la sombra para conservar la humedad durante el tiempo de curado de 7 y 14 días (ver figura 30). La figura 29 ilustra el proceso de aditivación y mezcla de cada uno de los materiales.

Figura 29 Proceso de aditivación y mezcla de los materiales. A) Suelo A-Qfe Lutita+Cemento. B) Suelo Mezclado homogéneamente. C) Adición de agua. D) Suelo húmedo mezclado.

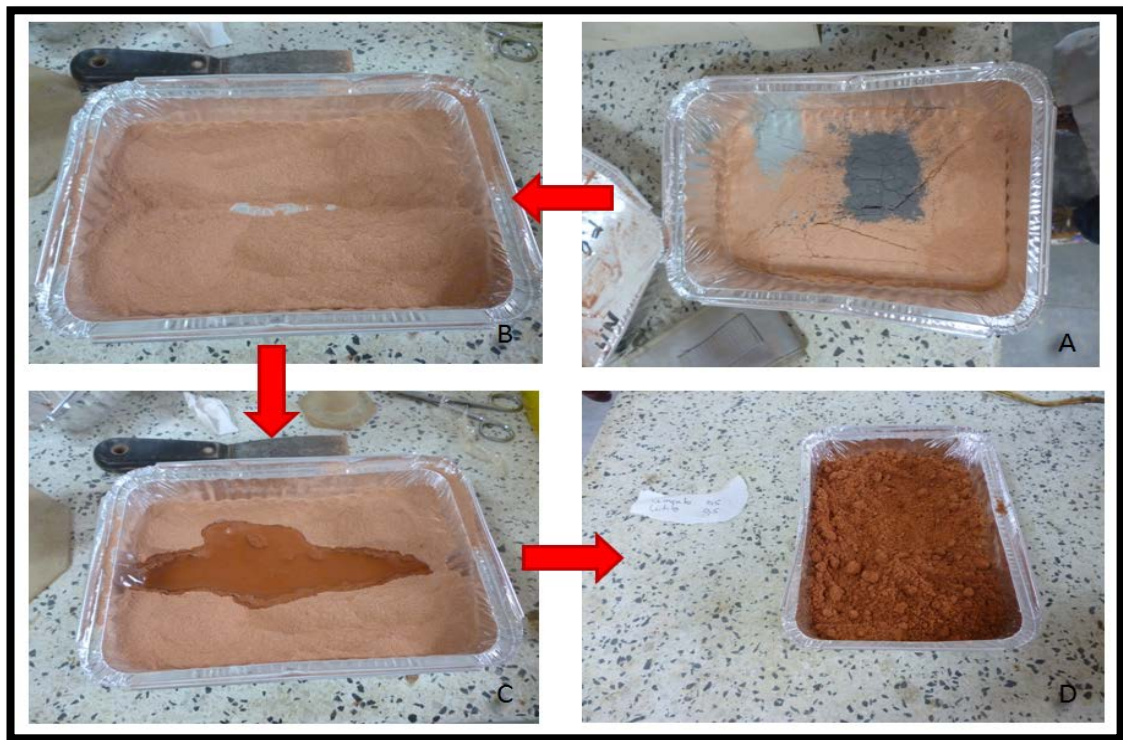


Figura 30 Muestras de suelo aditivadas dispuestas al tiempo curado.



Al pasar el tiempo de curado se llevaron a cabo ensayos para determinar el límite líquido y el límite plástico de acuerdo a la norma INV-E125 e INV E-126 (Ver anexos B y D), los resultados obtenidos se presentan en las tablas 20 y 21, en ellas se indica que las muestras con mayor disminución del Índice de plasticidad fueron las aditivadas con el 1% de lutita compacta y el 1% de cemento a los 7 días de curado. Este parámetro se tomó como un filtro para seleccionar las muestras que presentaban una disminución en el Índice de plasticidad. No obstante la combinación de 0.5 cemento + 0.5 lutita también mostraron mejoras en ambos suelos, por lo que se decide analizar química y petrográficamente.

La caracterización previa de los suelos A y B permitió tener un referente de las propiedades geotécnicas y químicas del material original, para así establecer los cambios con respecto a las muestras aditivadas.

Tabla 20 Resultados índice de plasticidad para el suelo A-Qfe.

Combinaciones suelo A-Qfe				
Combinación	Lutita compacta	Cemento	Tiempo	Índice de plasticidad
	(%)	(%)	días	(%)
Sin Aditivo	*	*		11.96
1	0.5	0.5	7	2.25
2	0.5	1	7	8.43
3	1	0.5	7	12.86
4	1	1	7	0,18

Solo Lutita				
1*	0.5		7	4.19
2*	1		7	6.76
1*	0.5		14	*
2*	1		14	*

Tabla 21 Resultados índice de plasticidad para el suelo B-Kip

Combinaciones suelo B-Kip				
combinación	Lutita compacta	Cemento	Tiempo	Índice de plasticidad
	(%)	(%)	días	(%)
Sin Aditivo	*	*		16.4
1	0.5	0.5	7	4.49
2	0.5	1	7	10.5
3	1	0.5	7	9.21
4	1	1	7	3.65
5	0.5	0.5	14	9.11
6	0.5	1	14	18.34
7	1	0.5	14	4.6
8	1	1	14	7.25

Solo Lutita				
1*	0.5	0	7	13.02
2*	1	0	7	15.8
1*	0.5	0	14	11.5
2*	1	0	14	9.6

5.4. CARACTERIZACIÓN MUESTRAS ADITIVADAS.

Las muestras seleccionadas anteriormente fueron caracterizadas física y químicamente con el fin de evaluar los cambios con respecto al suelo original. La caracterización física se realizó para las muestras del suelo A y B con el 1% de lutita + el 1% de cemento portland, por otra parte la caracterización química se realizó para la misma muestra y adicionalmente a las aditivadas con el 0.5% de lutita+ 0.5% de cemento. Estos resultados se exponen a manera de tablas y gráficas, seguido de un breve análisis.

5.4.1. SUELO A-Qfe. (Aditivado1% Lutita+1%Cemento)

- **Análisis Caracterización Física.**

Índice de plasticidad disminuyó de 11.94% a 0.18% cambiando de manera inmediata su clasificación S.U.C.S a una arena limosa (SM), esto es, geotécnicamente más favorable, la variación en esta propiedad puede estar dada por el aumento de las fases cristalinas o disminución de minerales arcillosos expansivos. La humedad óptima aumentó en un 0.5% que no es verdaderamente significativo, pero este suelo aditivado puede ser más propenso absorber una mayor cantidad de agua sin colapsar.

El test de CBR es usado para medir la resistencia al deslizamiento del suelo con un contenido de agua controlado y densidad. Después del test un numero indica la tasa de capacidad de soporte (CBR) es obtenido. El CBR no es un numero constante y varía de acuerdo con el contenido de agua y densidad del suelo, en este caso el suelo A-Qfe aumento de 6 a 9 a los 26 golpes lo que según la tabla # 22 de las descripciones y usos de los suelos según el número de CBR pasa a de una calidad mala a media a ser de calidad media (*Ver anexo F*). En general se puede decir que hay una mejora en el comportamiento plástico del suelo, no

obstante en cuanto a la capacidad portante y de carga del suelo el cambio no es tan relevante.

Tabla 22 Caracterización física Suelo A-Qfe.

Propiedad	Suelo Original	Suelo Aditivado
Limite Líquido (%)	34.6	30.68
Limite Plástico (%)	22.65	30.5
Índice de plasticidad (%)	11.95	0.18
Humedad óptima (%)	9	9.5
Densidad máxima seca (Kg/m ³)	1950	1990
Humedad de compactación (%)	9	9.5
CBR 12 golpes	2	3
CBR 26 golpes	6	9
CBR 55 golpes	14	16
% expansión	1.74	2.04

- **Caracterización Química.**

En el desarrollo de la estabilización se utilizó como aditivo para mejorar el suelo la Lutita compacta, la cual es rica en calcita Magnesiana (CaCO₃) en combinación con el Cemento Portland (rico en sílice y Calcio). Las muestras que presentaron una mayor reducción en el índice de plasticidad fueron las muestras con las mezclas:

-0.5%Lutita+ 0.5%Cemento+ 7 días de curado

-1% Lutita+ 1% Cemento+ 7 días de curado.

Estas combinaciones corresponden a las muestras del suelo A identificadas como Qfe-1 y Qfe-4, esta disminución se atribuye al intercambio catiónico, que

disminuye el espesor de la doble capa de agua, y a un incremento en la atracción de las partículas arcilla. A nivel químico-mineralógico los resultados fueron determinados a partir de análisis cuantitativo de fases cristalinas en cada una de ellas, estos se exponen en las tablas 23 y 24. A pesar de que no hay apariciones de nuevas fases cristalinas, como es lo esperado si hay un cambio porcentual significativo para los contenidos de cuarzo [SiO_2], Caolinita [$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)\text{O}_{10}(\text{OH})_4$], por otra parte hay una disminución en el contenido de Microclina [KAlSi_3O_8], en cuanto a la Moscovita [$\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$], ésta no varío significativamente y la anatasa no fue cuantificable en ningún caso.

Tabla 23 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Qfe-1

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo	15.2 % (0.3)
	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$	Microclina	13.3 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	7.0 % (0.1)
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	37.4 % (0.4)
	Ti O_2	Anatasa	N.C
Total Cristalino			72.9 %
Amorfos y otros			27.1 %

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. UIS Guatiguará.

Tabla 24 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Qfe-4.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo	20.8 % (0.9)
	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$	Microclina	9.1 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	7.7 % (0.1)
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	44.9 % (0.4)
	Ti O_2	Anatasa	N.C
Total Cristalino			82.5 %
Amorfos y otros			17.5 %

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. UIS Guatiguará.

En la figura 31 se observan los cambios según el grupo mineral tomando como base la muestra de suelo original Qfe(amarillo), las muestra Qfe-1 (magenta) y Qfe 4 (verde) también son reflejadas en el diagrama. Un aspecto muy importante a destacar es el aumento de los materiales cristalinos el cual llega al 82.5% para el caso de la muestra Qfe-4, esto quiere decir que al agregar el 1% en Lutita y el 1% en Cemento se generaron las condiciones adecuadas para dar lugar a reacciones puzolámicas, las cuales ocurren principalmente por la reacción entre los silicios amorfos (los cuales disminuyen de un 31.7 % a un 17.5%) y el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento y en este caso la lutita, a nivel físico esto es evidenciado por el aumento el Límite plástico y por ende disminución del Índice de plasticidad.

En la tabla 25 se observa el contenido composicional en peso atómico y en peso de la muestra Qfe-1, para el enfoque 1 elaborado en la partícula señalada en la Figura 32 y su espectro correspondiente en la figura 33. A pesar de que este primer enfoque fue en un punto determinado, el espectro y los porcentajes están muy variados, resaltando al Titanio con un 54.79%, Hierro con un 10.25%, Oxígeno con un 23.82% y elementos asociados a los minerales ricos en Aluminio-Silicatos, este espectro posiblemente corresponde a una partícula mineral de Anatasa (TiO_2) previamente identificada en las fases cristalinas del DRX, no obstante la aparición de otros elementos no asociados a su fórmula química pueden ser producto de alteraciones generadas por la cercanía con otros elementos dado el estado de la muestra.

Figura 31 Descripción de los resultados DRX del suelo Original y estabilizado.

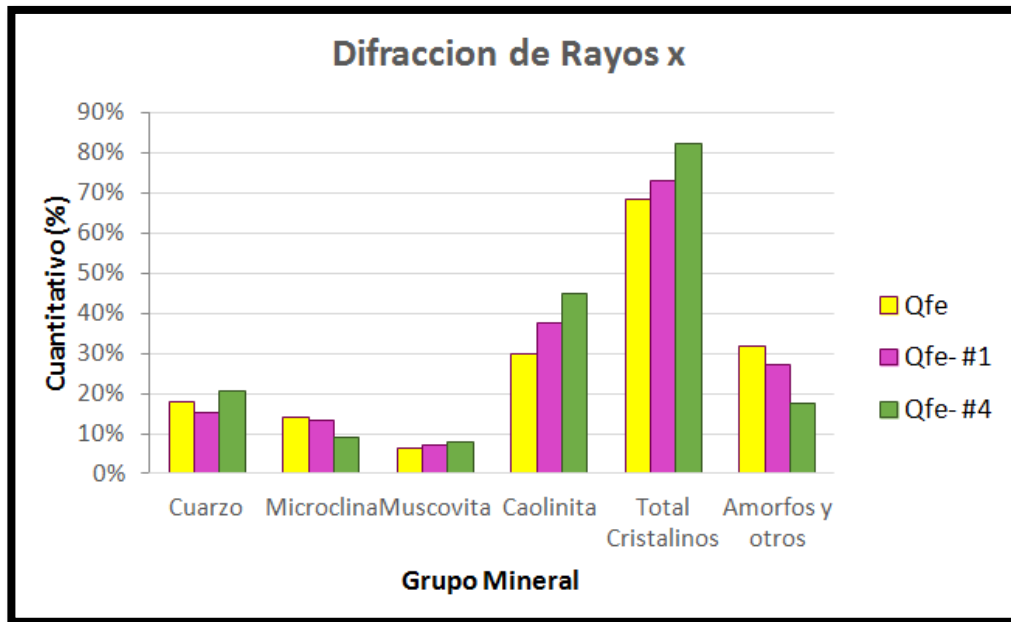
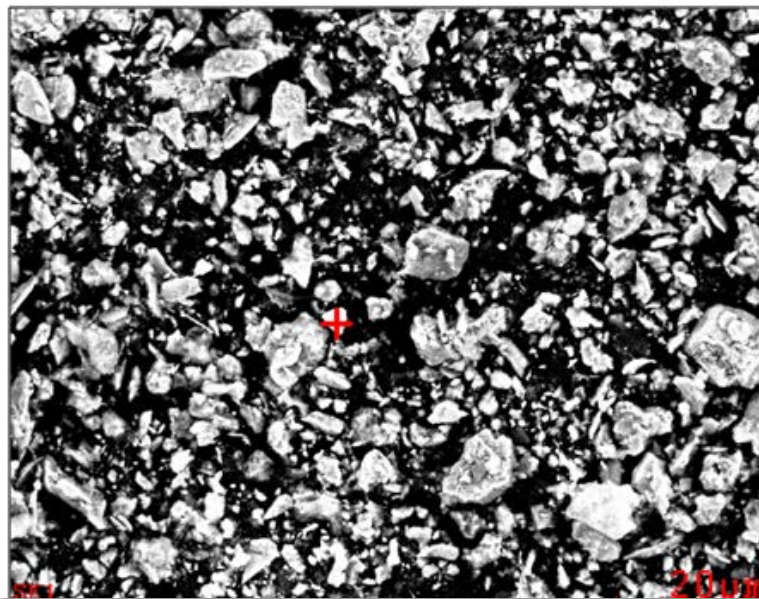


Figura 32 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Qfe-1 (NF-1Qfe).

Enfoque 1.



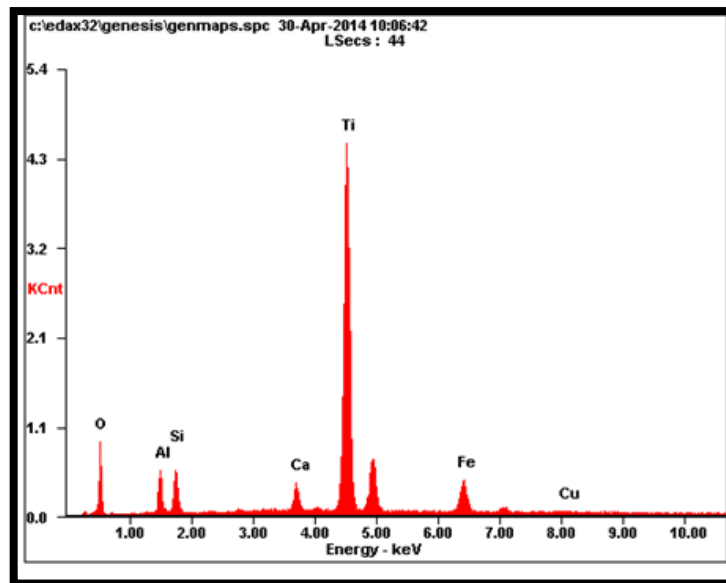
Fuente: Laboratorio SEM. UIS, Guatiguará.

Tabla 25 Porcentaje atómico y porcentaje en peso de la muestra Qfe-1. (0.5 Lutita+ 0.5 Cemento).

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	<i>23.82</i>	<i>47.02</i>
<i>AlK</i>	<i>3.65</i>	<i>4.27</i>
<i>SiK</i>	<i>3.69</i>	<i>4.15</i>
<i>CaK</i>	<i>2.53</i>	<i>1.99</i>
<i>TiK</i>	<i>54.79</i>	<i>36.13</i>
<i>FeK</i>	<i>10.25</i>	<i>5.8</i>
<i>CuK</i>	<i>1.28</i>	<i>0.64</i>
<i>Matrix</i>	<i>Correction</i>	<i>ZAF</i>

Fuente: Laboratorio SEM. UIS, Guatiguará.

Figura 33 Espectrograma de la composición química de la muestra Qfe-1 en el enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS Guatiguará

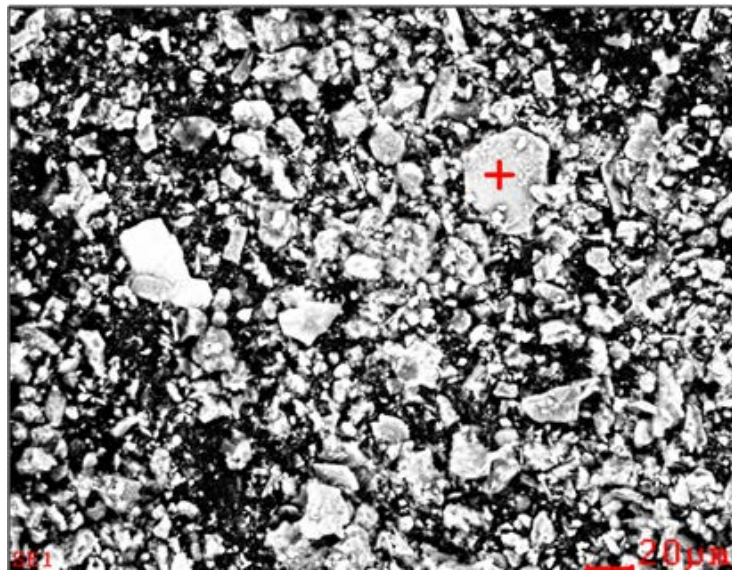
Tabla 26 Porcentaje atómico y en peso de la muestra Qfe-4. (1% Lutita+ 1% Cemento). Enfoque 1.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	38.22	53.36
<i>NaK</i>	0.47	0.45
<i>MgK</i>	0.58	0.53
<i>AlK</i>	21.65	17.92
<i>SiK</i>	26.54	21.11
<i>KK</i>	9.32	5.32
<i>TiK</i>	0.42	0.2
<i>FeK</i>	2.33	0.93
<i>CuK</i>	0.48	0.17
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM. UIS Guatiguará

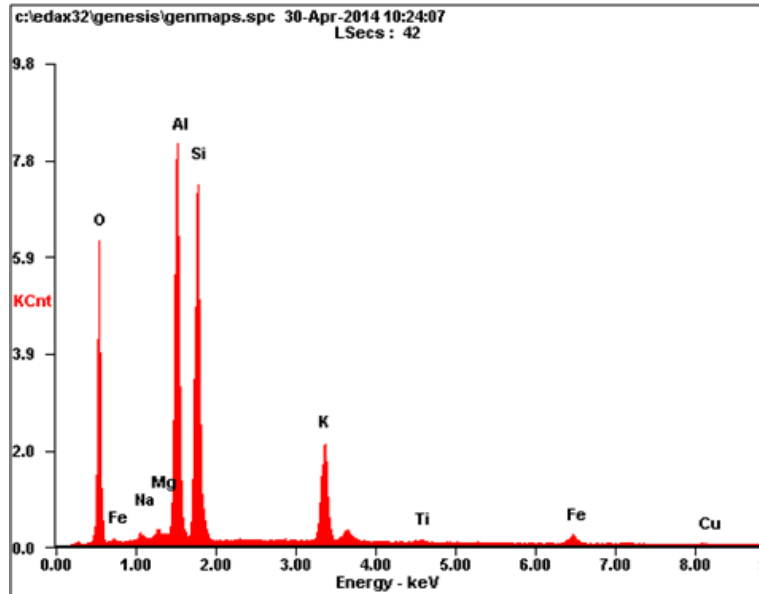
Figura 34. Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Qfe-4 (NF-Qfe).

Enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS, Guatiguará.

Figura 35 Espectrograma de la composición química de la muestra Qfe-4 en el enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS, Guatiguará.

Para la muestra Qfe-4 con el 1% de Lutita y el 1% de cemento se destaca el contenido de oxígeno 38.22%, sílice 26.54%, aluminio 21.65%. Estos valores son bastante mayores con respecto al contenido en peso de la muestra Qfe-1 (Ver tabla 26), este resultado es coherente con los resultados obtenidos a partir de la difracción de rayos X, y apuntan a que efectivamente esta combinación es la más favorable a la creación de puzolanas que dan un mejor desempeño al suelo. Estos resultados químico-mineralógicos en conjunto con los ensayos físicos dan una mayor visión acerca de la capacidad estabilizante de estos dos materiales.

5.4.2. SUELO B Kip. (Aditivado 1% Lutita+1% Cemento)

- **Análisis Caracterización Física.**

Para el caso de la muestra Kip el índice de plasticidad disminuyó de 16.4% a 3.65% lo cual es, según la S.U.C.S pasar de un Limo Elástico Arenoso (CH) a un Limo Arenoso (ML), esto se genera gracias a la disminución del límite líquido, el cual pasa de un 56.36% a un 39.15%, y está directamente relacionado con el proceso de estabilización. El porcentaje de humedad óptima del suelo Kip, al ser añadido el cemento y la lutita compacta aumento en un 5%, lo cual significa en términos geotécnicos que el suelo va a estar en capacidad de absorber una mayor cantidad de agua.

El test de CBR para este suelo no varió significativamente y por ende tampoco su definición de suelo muy malo según Ayteky 2004. La densidad disminuye un poco, lo cual en términos ingenieriles no es muy bueno ya que a partir de la estabilización se busca lograr de manera controlada un material más homogéneo y por ende más denso, éste parámetro podría explicar la no variación del número de CBR (*Ver anexo H*).

Físicamente se podría decir que el suelo mejoró gran parte de sus características geotécnicas, pese a esto habría que tener en cuenta a la hora de estabilizar el tipo de carga que pasaría por una vía estabilizada con este material ya que la capacidad portante no mejoró de manera significativa por lo que no sería recomendable en suelos con características similares a las del suelo residual de la formación Paja, es decir suelos ricos en materia orgánica. En la tabla 27 se relacionan cada uno de los parámetros tenidos en cuenta para la evaluación de la estabilización del suelo B-Kip.

Tabla 27 Caracterización Física Suelo B-Kip.

Propiedad	Suelo Original	Suelo Aditivado
Límite Líquido (%)	56.36	39.15
Límite Plástico (%)	39.97	35.5
Índice de plasticidad (%)	16.4	3.65
Humedad óptima (%)	15.5	21
Densidad máxima seca (Kg/m ³)	1935	1820
Humedad de compactación (%)	15.43	21
CBR 12 golpes	2	1
CBR 26 golpes	3	3
CBR 55 golpes	5	5
% expansión	5.14	4.61

- **Caracterización Química.**

Químicamente, al igual que el suelo A-Qfe, el suelo B-Kip presentó mejoras significativas al ser aditivado con Lutita Compacta y Cemento Portland en cuanto al límite líquido y el Índice Plástico, éstas propiedades fueron un filtro para seleccionar de las muestras analizarlas petrográfica y químicamente. A continuación las combinaciones estudiadas:

-0.5%Lutita+ 0.5%Cemento+ 7 días de curado

-1% Lutita+ 1% Cemento+ 7 días de curado.

Estas muestras fueron denominadas como Kip-1 y Kip-4 respectivamente, en ambos casos no hubo apariciones de nuevas fases cristalinas en el análisis cuantitativo, a nivel químico mineralógico no se logra establecer una relación al aumentar la dosis de Lutita y Cemento al 1%. En las tablas 28 y 29 se describen cada una de las fases cristalinas de las muestras Kip-1 y Kip-4. En cuanto a reacciones puzolámicas, son prácticamente nulas ya que el porcentaje de amorfos disminuye en el mayor de los casos del 59.9% al 53%, este resultado esta

probablemente asociado la cantidad de materia orgánica contenido en el suelo, el cual inhibe como tal la estabilización, sin embargo hay que destacar que el comportamiento plástico mejoró notablemente.

Tabla 28 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Kip-1.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo	11.8 % (0.2)
	Fe O (OH)	Lepidocrocita	4.3 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	11.1 % (0.3)
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	19.8 % (0.4)
	Ti O_2	Anatasa	N.C
Total Cristalino			47.0 %
Amorfos y otros			53.0 %

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. UIS Guatiguará.

Tabla 29 Resultado Cuantitativo DRX para la muestra Kip-4.

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo	11.3 % (0.2)
	Fe O (OH)	Lepidocrocita	3.1 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	Moscovita	10.1 % (0.3)
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2 \text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	16.6 % (0.4)
	Ti O_2	Anatasa	N.C
Total Cristalino			41.1 %
Amorfos y otros			58.9 %

Laboratorio de Difracción de Rayos X. UIS Guatiguará.

En la figura 36 se observan los cambios según el grupo mineral tomando como base la muestra de suelo original Kip(amarillo), las muestra Kip-1 (magenta) y Kip-4 (verde) también son reflejadas en el diagrama. Los materiales cristalinos no varían proporcionalmente, tan solo llegan al 41.1% para el caso de la muestra Kip-4, esto quiere decir que al agregar el 1% en Lutita y el 1% en Cemento no se generaron las condiciones adecuadas para dar lugar a reacciones puzolámicas, es

decir reacción hubo reacciones de intercambio catiónico en los materiales amorfos (solo varían en un 6% para el caso de la Kip-1).

En la tabla 30 se observa el contenido composicional en peso atómico y en peso de la muestra Kip-1, para el enfoque 1 elaborado en la partícula señalada en la Figura 37 y su espectro correspondiente en la figura 38. A pesar de que este primer enfoque fue en un punto determinado, el espectro y los porcentajes están muy variados, resaltando al Hierro con un 42.24%, Oxígeno con un 30.83% y elementos asociados a los minerales ricos en Aluminio-Silicatos, este espectro posiblemente corresponde a una partícula mineral de Lepidocrocita (FeO(OH)) previamente identificada en las fases cristalinas del DRX.

Figura 36 Descripción de los resultados DRX del suelo Original y estabilizado.

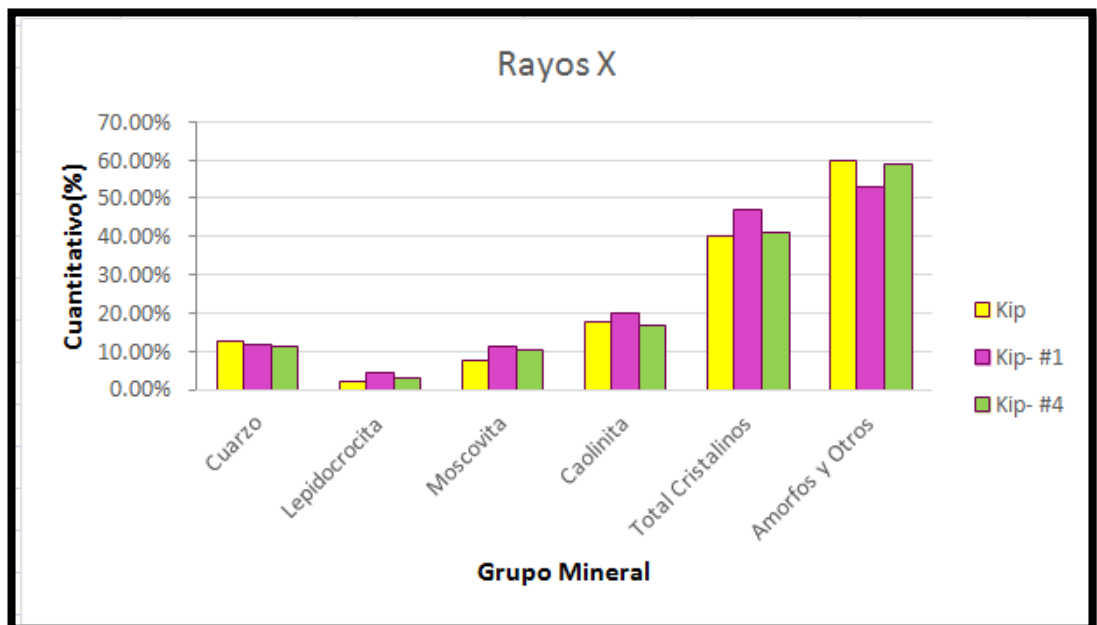
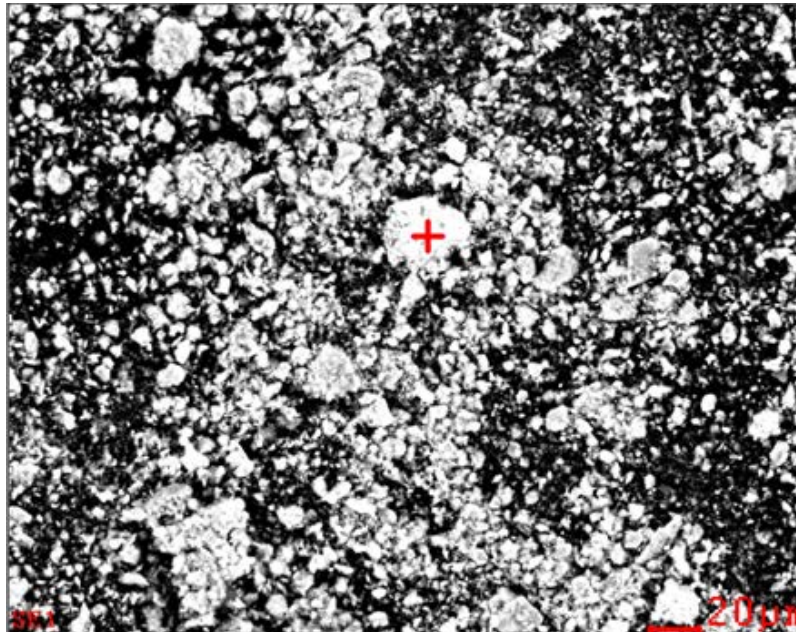


Figura 37 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Kip-1 (NF-Kip).

Enfoque 1.



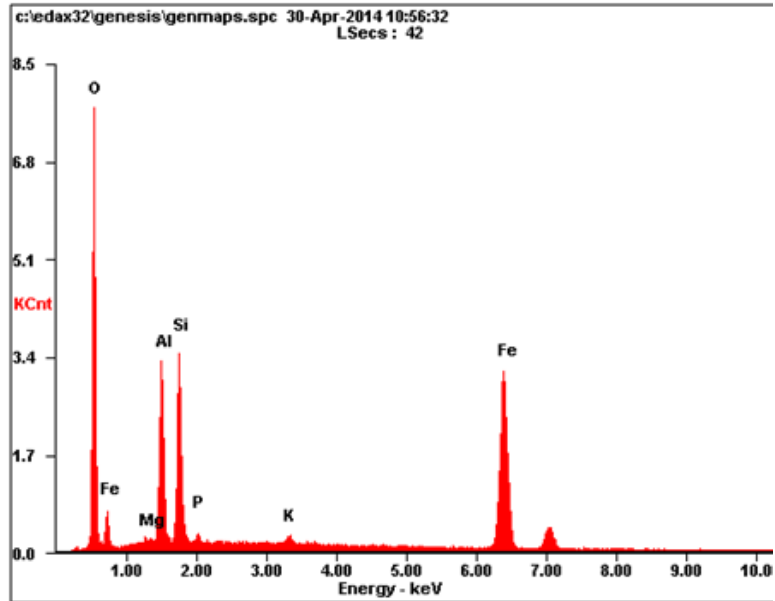
Fuente: Laboratorio SEM. UIS Guatiguará

Tabla 30 Porcentaje atómico y en peso de la muestra Kip-1. (0.5% Lutita+ 0.5% Cemento). Enfoque 1.

Element	Wt%	At%
OK	30.83	52.75
MgK	0.35	0.39
AlK	12.51	12.69
SiK	12.75	12.43
PK	0.58	0.51
KK	0.75	0.52
FeK	42.24	20.7
Matrix	Correction	ZAF

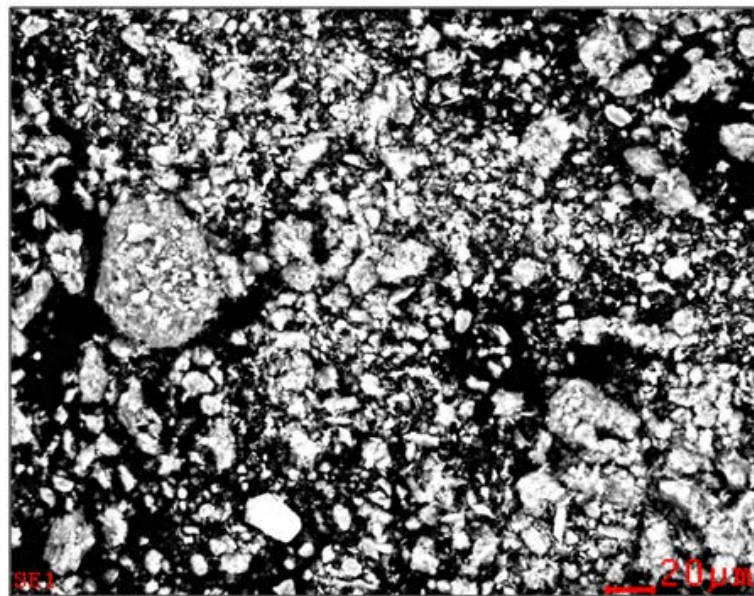
Fuente: Laboratorio SEM. UIS, Guatiguará.

Figura 38 Espectrograma de la composición química de la muestra Kip-1 en el enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS Guatiguará.

Figura 39 Imagen del SEM-EDS realizado a la muestra Kip-4 (NF-4Kip).



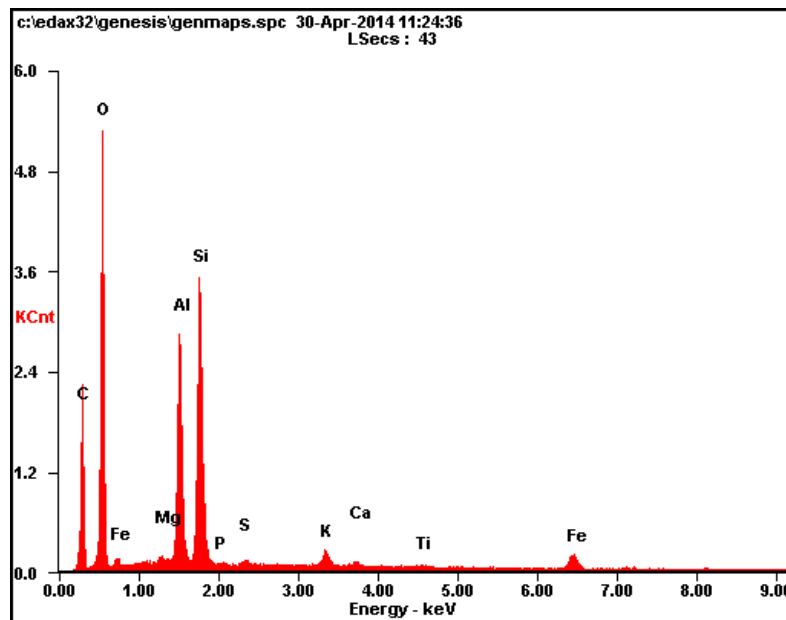
Fuente: Laboratorio SEM. UIS Guatiguará

Tabla 31 Porcentaje atómico y en peso de la muestra Kip-4. (1% Lutita+ 1% Cemento). Enfoque 1.

Element	Wt%	At%
CK	30.4	41.63
OK	42	43.17
MgK	0.28	0.19
AlK	9.45	5.76
SiK	12.88	7.54
PK	0.04	0.02
SK	0.23	0.12
KK	0.99	0.42
CaK	0.3	0.12
TiK	0.31	0.11
FeK	3.1	0.91
Matrix	Correction	ZAF

Fuente: Laboratorio SEM. UIS, Guatiguará.

Figura 40 Espectrograma de la composición química de la muestra Kip-4 en el enfoque 1.



Fuente: Laboratorio SEM. UIS, Guatiguará.

6. CONCLUSIONES

Al realizar la aditivación a los suelos con el residuo de minería, se analizaron los resultados y se llegó a las siguientes conclusiones:

- Al aditivar los suelos con Lutita Compacta y Cemento portland con concentraciones mínimas de 0.5 y máximas del 1%, combinadas se determinó que las muestras con valores iguales (0.5 Lutita+0.5 Cemento) ó (1% Lutita+1%Cemento) generaron cambios físicos en los límites de Atterberg, donde disminuyó el límite líquido y por ende disminuyó significativamente el Índice Plástico. El caso del suelo A-Qfe, presentó variación en su índice de plasticidad en las muestras Qfe-1 y Qfe-4 del 11.96 al 2.26 y 0.18% respectivamente, al ser aditivado con un tiempo de curado de 7 días. El caso del suelo B-Kip ocurrió de manera similar, también se disminuyó su límite líquido e Índice plástico de un 16.40% al 5.05% para la muestra Kip-1 y 3.65 para Kip-4. Al presentar una disminución mayor al aditivar con el 1% de concentración se concluye que ésta combinación es la más favorable entre las combinaciones propuestas en la matriz experimental.
- A partir de análisis de Difracción de Rayos X a las muestras que mostraron una mayor disminución en sus límites de Atterberg e Índice de plasticidad para cada suelo, es decir las muestras Qfe-1 muestran un aumento en los porcentajes de las fases cristalinas, sin embargo no hay aparición de nuevos minerales ni fases cristalinas. Se destaca la disminución en el porcentaje de amorfos en el caso del suelo A-Qfe.

- El suelo residual de la Formación Paja denominado como suelo B-Kip al ser aditivado con el 0.5% y 1% de Lutita+Cemento no se logró un aumento de las fases cristalinas, resultado que puede estar fuertemente influenciado por el alto contenido de materia orgánica en el suelo B.
- El análisis de Proctor evidenció un aumento en la humedad óptima de cada suelo, es decir ante la presencia de agua, este se comporta de manera aceptable, sin embargo los análisis de CBR antes y después de la aditivación no evidencian una mejora significativa en los dos suelos.
- Los resultados muestran que el residuo de minería denominado Lutita compacta al ser mezclado con suelo, sirva para mejorar las propiedades físicas del suelo, sin embargo en cuanto a la resistencia y capacidad portante del suelo, no hay un cambio veraz que garantice la estabilidad del suelo para vías terciarias, ya que los cambios fisicoquímicos presentes pueden estar más asociado a una acción cementante que de carácter químico.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una investigación en la cual la adición de lutita se haga en porcentajes del 2 y 4% en suelos que no posean alto contenido de materia orgánica, para así comprobar si mejora sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas.
- Se sugiere realizar un ensayo de expansión (Norma INVE-132-07) para observar la expansión – contracción de los suelos arcillosos original y al suelo aditivado, también sería importante trabajar con suelos realmente expansivos, para así saber cómo se comporta al adicionar la lutita compacta.
- Partiendo de los resultados, se podría decir que la estabilización de suelos implementando la lutita como aditivo, nos arroja resultados contradictorios en algunas propiedades, por lo cual es recomendable implementar otra alternativas de investigación sobre la lutita como agente estabilizante, donde se determine a fondo la cantidad de aditivo a emplear dependiendo de las características químicas y mineralógicas de cada suelo a tratar.
- Se recomienda comprobar estas condiciones en hecho reales, es decir puestas en obra, para así verificar si trae aspectos efectivos reales en campo, ya que se han realizado solo métodos experimentales, los cuales solo son ensayados en condiciones controladas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AYTEKIN M., Experimental Soil Mechanics. Technical Publishing Company. Expanded Second Edition, Turquía, Ankara, 2005. P.1-634.
2. BELL, F., Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology. N° 42. p. 223-237. 1996.
3. CHIOSSI N. J., Geología Aplicada a Ingenharía, Universidad de Sao Pablo, Editores de la Universidad de Sao Pablo. Brasil, Sao Pablo, 1975. p. 1- 250.
4. CRESPO C., Mecánica de Suelos y Cimentaciones, México, Grupo Noriega Editores, 2005. p. 1-127.
5. DUNN I., KIEFER F., LOREN A., Fundamentals of Geotechnical analysis. Utah University, Canadá, 1980.
6. DE SOLMINIHAC H., ECHEVERRIA G., THENOUX G. Estabilización química de suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, Santiago de Chile, 1998, p. 1-24
7. EREN S., FILIZ M. Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material. Construction and Building Materials. Vol. 23. 2009. p.1-8.
8. GARNICA P., PEREZ A., GÓMEZ J., YHAARABY E., Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica N° 201, México, 2002.

9. GONZALES L., FERRER M., ORTUÑO L., OTEO C., Libro de Ingeniería Geológica, Capítulo 2, p. 19, Madrid, Prentice Hall, 2002.
10. JUAREZ E., RICO A., Mecánica de Suelos I: Fundamentos De La Mecánica De Suelo, México, Noriega editores, 2005, p. 37.
11. KUEL R., Diseño de Experimentos, Segunda Edición, Thompson Learning. 2001.
12. LEE K., Geotechnical engineering. The University of New South Wales. Australia, 1983.
13. MCDOWELL, C., Stabilization of soil with lime, lime-flyash and other lime reactive materials. Washington, DC., 1959, p.60-66.
14. MENDOZA E., MURILLO E., Evaluación de la aplicación de residuos de minería de yeso (mesa de los santos, Santander) en la estabilización química de suelos. Trabajo de grado geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2003.
15. MARTÍNEZ J., MONTES P., Reactividad puzolánica de una arcilla regional, Revista Naturaleza y desarrollo Vol. 5, número 2. 2007, p.43
16. NARANJO F., SOLANO V, Impactos ambientales de la minería en Colombia. [en línea] <<http://www.slideshare.net/elturcolopez/impactos-ambientales-de-la-mineria-en-colombia>> [citado en 3 de septiembre de 2014]

17. PACHECO Y., RINCON P., Caracterización de residuos de minería del yeso para evaluar la reactividad álcali-agregado. Trabajo de grado geología. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2013. p. 33-54.
18. RAJ P., Geotechnical engineering. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. India, New Delhi, 1995. p. 1-777.
19. ROMERO E., RESIDUOS MINEROS. Apuntes de Ingeniería Ambiental. Universidad de Huelva. Ingeniería Ambiental. España, 2007, p. 1-38.
20. VALLE W., Estabilización de suelos arcillosos Plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos. Trabajo de grado Maestría. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. P. 19-68.
21. YILMAZ I., CIVELEKOGLU B., Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils, Cumhuriyet. University Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Sivas, Turkey, Applied Clay Science vol. 44, p. 166–172, 2009.

ANEXOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)

FECHA : 07-abr-14

MUESTRA : Qfe

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

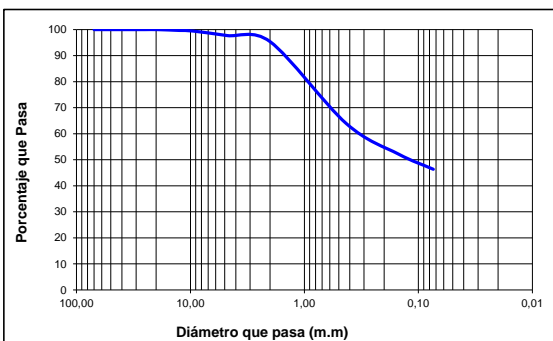
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 80,10
W tara + S. Seco : 68,20
W tara : 5,70
W Suelo Seco : 62,50
W Agua : 11,90
Humedad Natural % : **19,04**

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	3,40	0,32	99,68
3/8	9,50	2,40	0,23	99,45
4	4,76	18,30	1,74	97,70
10	2,00	24,60	2,35	95,36
40	0,43	329,60	31,43	63,93
100	0,149	123,60	11,78	52,15
200	0,074	60,80	5,80	46,35
PASA 200	...	485,86		
TOTAL		1048,56		

W suelo inicial seco : 1.048,80 grs
W suelo despues de lavado: 563,40 grs
Porcentaje de error : 0,02 %



GRAVA: 2,30
ARENA: 51,35
FINOS: 46,35

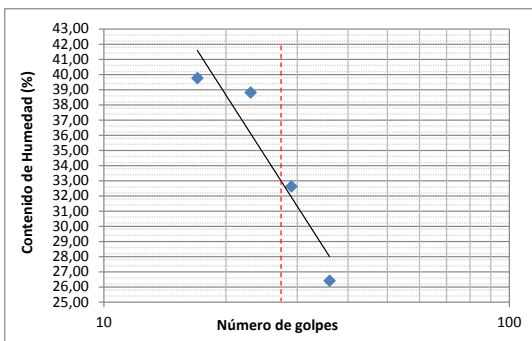
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 35,727554 INV. E - 125

Tara No.	255	569	317	73
W Tara + S. Hum.	21,40	22,50	22,00	21,90
W tara + S. Seco	18,60	19,40	18,70	18,40
W tara	8,00	9,90	10,20	9,60
W Suelo Seco	10,60	9,50	8,50	8,80
W Agua	2,80	3,10	3,30	3,50
Humedad %	26,42	32,63	38,82	39,77
No. de Golpes	36	29	23	17

LIMITE PLASTICO INV. E - 126

Tara No.	573	566	205	
W tara + S Hum.	19,90	23,30	21,40	
W tara + S. Seco	17,70	20,50	18,70	
W tara	8,00	8,00	6,90	
W Suelo Seco	9,70	12,50	11,80	
W Agua	2,20	2,80	2,70	
Humedad %	22,68	22,40	22,88	22,65



LIMITE LIQUIDO: 34,60
LIMITE PLASTICO: 22,65
INDICE PLASTICO: 11,95
ASTM: SC
AASTHO: A-4
CLASIFICACION: ARENA ARCILLOSA

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA : Qfe-#1 Lutita 0,5+ Cemento 0,5
TIEMPO : 7 días

FECHA : 07-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

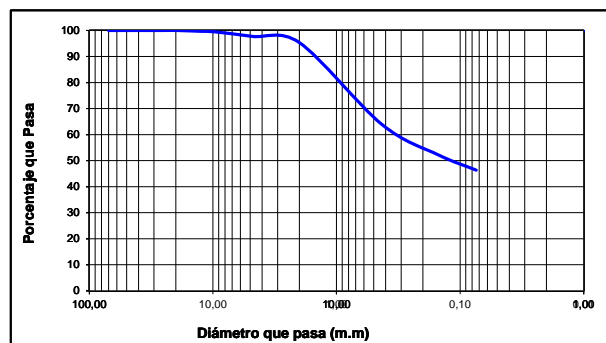
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 80,10
 W tara + S. Seco : 68,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 62,50
 W Agua : 11,90
Humedad Natural % : 19,04

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	3,40	0,32	99,68
3/8	9,50	2,40	0,23	99,45
4	4,76	18,30	1,74	97,70
10	2,00	24,60	2,35	95,36
40	0,43	329,60	31,43	63,93
100	0,149	123,60	11,78	52,15
200	0,074	60,80	5,80	46,35
PASA 200	...	485,86		
TOTAL		1048,56		

W suelo inicial seco : 1.048,80 grs
 W suelo despues de lavado: 563,40 grs
 Porcentaje de error : 0,02 %



GRAVA: 2,30
ARENA: 51,35
FINOS: 46,35

DIA 14 DE CURADO LA MUESTRA SE COMPORTA DE MANERA NO PLASTICA. NP

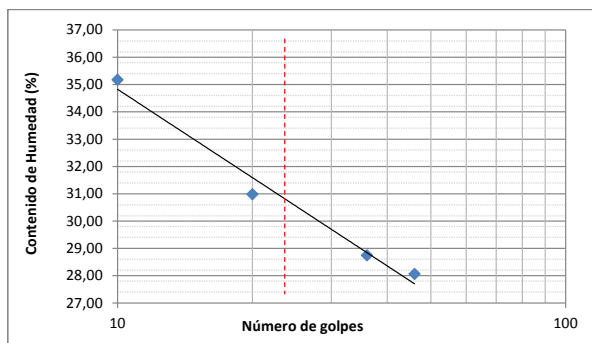
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 29,864121

Tara No.	3	4	5	6
W Tara + S. Hum.	20,24	21,25	23,34	20,07
W tara + S. Seco	16,28	16,99	18,33	15,42
W tara	2,17	2,17	2,16	2,20
W Suelo Seco	14,11	14,82	16,17	13,22
W Agua	3,96	4,26	5,01	4,65
Humedad %	28,07	28,74	30,98	35,17
No. de Golpes	46	36	20	10

LIMITE PLASTICO 27,607764

Tara No.	1	2		
W tara + S Hum.	11,40	11,36		
W tara + S. Seco	9,20	9,58		
W tara	2,14	2,18		
W Suelo Seco	7,06	7,40		
W Agua	2,20	1,78		
Humedad %	31,16	24,05		27,61



LIMITE LIQUIDO: 29,86
LIMITE PLASTICO: 27,61
INDICE PLASTICO: 2,26
ASTM SM
AASTHO A-4
CLASIFICACION: ARENA LIMOSA

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
 MUESTRA : Qfe-#2 Lutita 0,5+ Cemento 1
 TIEMPO : 7 días

 FECHA : 07-abr-14

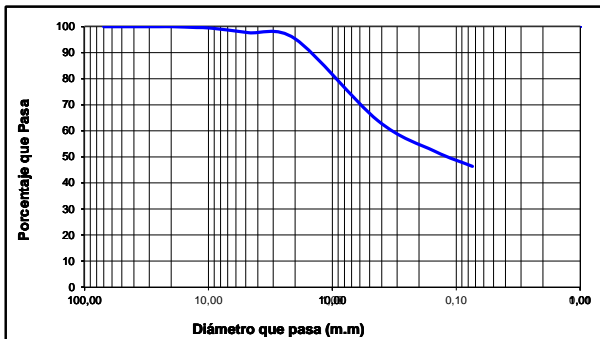
 ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 80,10
 W tara + S. Seco : 68,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 62,50
 W Agua : 11,90
Humedad Natural % : 19,04

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	3,40	0,32	99,68
3/8	9,50	2,40	0,23	99,45
4	4,76	18,30	1,74	97,70
10	2,00	24,60	2,35	95,36
40	0,43	329,60	31,43	63,93
100	0,149	123,60	11,78	52,15
200	0,074	60,80	5,80	46,35
PASA 200	...	485,86		
TOTAL		1048,56		

W suelo inicial seco : 1.048,80 grs
 W suelo despues de lavado: 563,40 grs
 Porcentaje de error : 0,02 %



GRAVA: 2,30
 ARENA: 51,35
 FINOS: 46,35

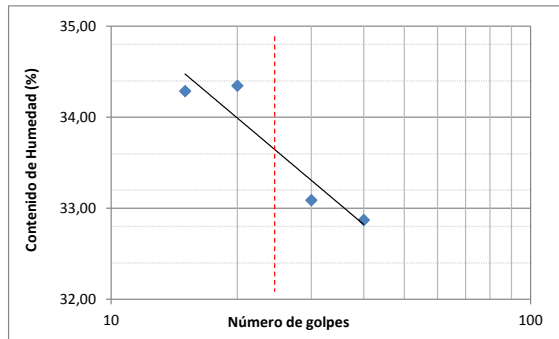
DIA 14 DE CURADO LA MUESTRA SE COMPORTA DE MANERA NO PLASTICA. NP

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)
LIMITE LIQUIDO 33,717439

Tara No.	26	27	28	29
W Tara + S. Hum.	20,29	21,19	23,38	23,68
W tara + S. Seco	16,02	16,68	18,18	18,41
W tara	3,03	3,05	3,04	3,04
W Suelo Seco	12,99	13,63	15,14	15,37
W Agua	4,27	4,51	5,20	5,27
Humedad %	32,87	33,09	34,35	34,29
No. de Golpes	40	30	20	15

LIMITE PLASTICO 25,286945

Tara No.	15	16		
W tara + S Hum.	10,20	11,16		
W tara + S. Seco	8,97	9,28		
W tara	3,01	3,00		
W Suelo Seco	5,96	6,28		
W Agua	1,23	1,88		
Humedad %	20,64	29,94		25,29



LIMITE LIQUIDO: 33,72
 LIMITE PLASTICO: 25,29
 INDICE PLASTICO: 8,43
 ASTM: SC
 AASTHO: A-4
 CLASIFICACION: ARENA ARCILLOSA

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)

FECHA : 07-abr-14

MUESTRA : Qfe-#3 Lutita 1+ Cemento 0,5

ELABORÓ: Fernada Ballesteros

TIEMPO : 7 días

Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 80,10
 W tara + S. Seco : 68,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 62,50
 W Agua : 11,90
Humedad Natural % : 19,04

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO

30,982183

Tara No.	20	21	22	19
W Tara + S. Hum.	21,32	26,47	26,63	24,44
W tara + S. Seco	17,20	21,08	20,86	19,20
W tara	2,96	2,95	2,96	2,98
W Suelo Seco	14,24	18,13	17,90	16,22
W Agua	4,12	5,39	5,77	5,24
Humedad %	28,93	29,73	32,23	32,31
No. de Golpes	45	38	22	16

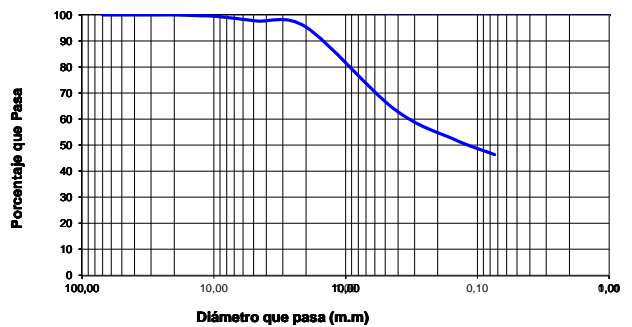
LIMITE PLASTICO

18,124293

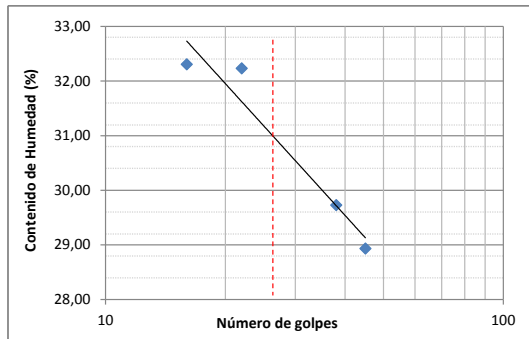
Tara No.	8	7		
W tara + S Hum.	10,43	10,76		
W tara + S. Seco	8,40	10,47		
W tara	2,20	2,20		
W Suelo Seco	6,20	8,27		
W Agua	2,03	0,29		
Humedad %	32,74	3,51		18,12

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	3,40	0,32	99,68
3/8	9,50	2,40	0,23	99,45
4	4,76	18,30	1,74	97,70
10	2,00	24,60	2,35	95,36
40	0,43	329,60	31,43	63,93
100	0,149	123,60	11,78	52,15
200	0,074	60,80	5,80	46,35
PASA 200	...	485,86		
TOTAL		1048,56		

W suelo inicial seco : 1.048,80 grs
 W suelo despues de lavado: 563,40 grs
 Porcentaje de error : 0,02 %



2,30
51,35
46,35



LIMITE LIQUIDO: 30,98
LIMITE PLASTICO: 18,12
INDICE PLASTICO: 12,86
ASTM: SC
AASTHO: A-6
CLASIFICACION: ARENA ARCILLOSA

DIA 14 DE CURADO LA MUESTRA SE COMPORTA DE MANERA NO PLASTICA.

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)

MUESTRA : Qfe-#4 Lutita 1+ Cemento 1

TIEMPO : 7 días

FECHA : 07-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 80,10
W tara + S. Seco : 68,20
W tara : 5,70
W Suelo Seco : 62,50
W Agua : 11,90
Humedad Natural % : **19,04**

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	3,40	0,32	99,68
3/8	9,50	2,40	0,23	99,45
4	4,76	18,30	1,74	97,70
10	2,00	24,60	2,35	95,36
40	0,43	329,60	31,43	63,93
100	0,149	123,60	11,78	52,15
200	0,074	60,80	5,80	46,35
PASA 200	...	485,86		
TOTAL		1048,56		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

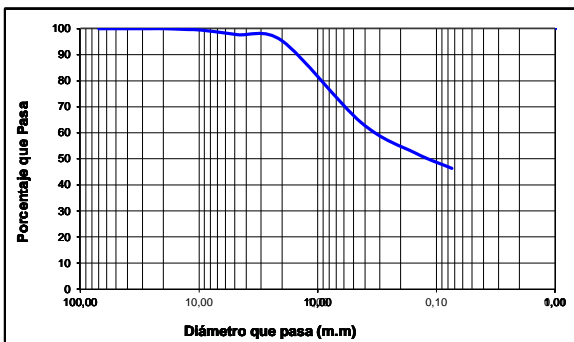
LIMITE LIQUIDO 30,677946

Tara No.	25	30	31	32
W Tara + S. Hum.	25,58	29,33	29,52	26,47
W tara + S. Seco	20,53	23,36	23,07	20,64
W tara	3,00	2,95	2,98	2,98
W Suelo Seco	17,53	20,41	20,09	17,66
W Agua	5,05	5,97	6,45	5,83
Humedad %	28,81	29,25	32,11	33,01
No. de Golpes	48	32	20	15

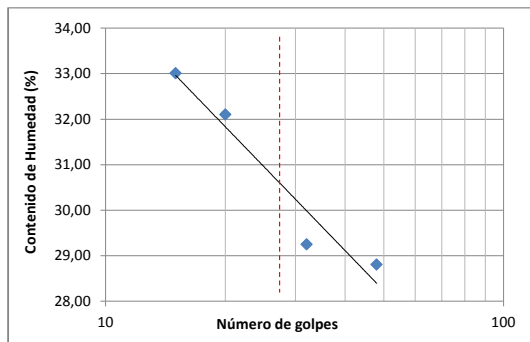
LIMITE PLASTICO 30,49846

Tara No.	17	18		
W tara + S Hum.	10,43	11,42		
W tara + S. Seco	8,70	9,43		
W tara	2,97	2,97		
W Suelo Seco	5,73	6,46		
W Agua	1,73	1,99		
Humedad %	30,19	30,80		30,50

W suelo inicial seco : 1.048,80 grs
W suelo despues de lavado: 563,40 grs
Porcentaje de error : 0,02 %



GRAVA: 2,30
ARENA: 51,35
FINOS: 46,35



LIMITE LIQUIDO: 30,68
LIMITE PLASTICO: 30,50
INDICE PLASTICO: 0,18
ASTM: SM
AASTHO: A-4
CLASIFICACION: ARENA LIMOSA

DIA 14 DE CURADO LA MUESTRA SE COMPORTA DE MANERA NO PLASTICA. NP

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA : Qfe-#1* Lutita al 0,5
TIEMPO : 7 días

FECHA : 07-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 80,10
 W tara + S. Seco : 68,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 62,50
 W Agua : 11,90
Humedad Natural % : 19,04

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

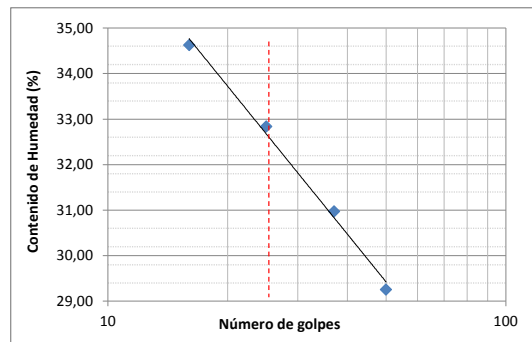
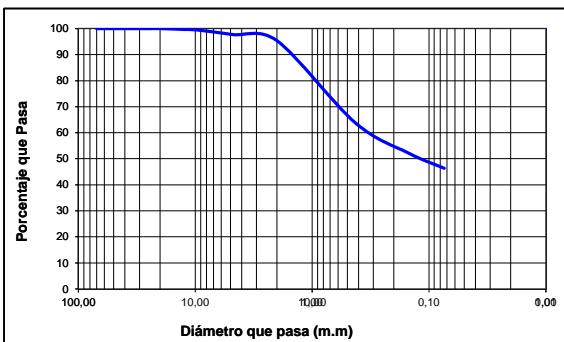
Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	3,40	0,32	99,68
3/8	9,50	2,40	0,23	99,45
4	4,76	18,30	1,74	97,70
10	2,00	24,60	2,35	95,36
40	0,43	329,60	31,43	63,93
100	0,149	123,60	11,78	52,15
200	0,074	60,80	5,80	46,35
PASA 200	...	485,86		
TOTAL		1048,56		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO		32,84			
Tara No.		33	34	35	36
W Tara + S. Hum.	21,27	21,69	22,65	26,49	
W tara + S. Seco	17,13	17,27	17,78	20,44	
W tara	2,98	3,00	2,95	2,97	
W Suelo Seco	14,15	14,27	14,83	17,47	
W Agua	4,14	4,42	4,87	6,05	
Humedad %	29,26	30,97	32,84	34,63	
No. de Golpes	50	37	25	16	

LIMITE PLASTICO		28,65388		
Tara No.		23	24	
W tara + S Hum.	11,12	11,72		
W tara + S. Seco	9,28	9,80		
W tara	2,96	2,99		
W Suelo Seco	6,32	6,81		
W Agua	1,84	1,92		
Humedad %	29,11	28,19		28,65

W suelo inicial seco : 1.048,80 grs
 W suelo despues de lavado: 563,40 grs
 Porcentaje de error : 0,02 %



GRAVA: 2,30
ARENA: 51,35
FINOS: 46,35

LIMITE LIQUIDO: 32,84
LIMITE PLASTICO: 28,65
INDICE PLASTICO: 4,19
ASTM: SC-SM

DIA 14 DE CURADO LA MUESTRA SE COMPORTA DE MANERA NO PLASTICA. NP

AASTHO: A-4
CLASIFICACION: ARENA LIMO ARCILLOSA

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)

FECHA : 07-abr-14

MUESTRA : Qfe-#2* Lutita al 1

TIEMPO : 7 días

ELABORÓ: Fernada Ballesteros

Nathalia Mantilla

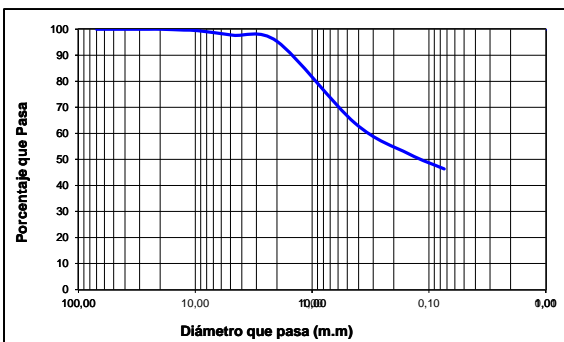
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 80,10
 W tara + S. Seco : 68,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 62,50
 W Agua : 11,90
 Humedad Natural % : **19,04**

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	3,40	0,32	99,68
3/8	9,50	2,40	0,23	99,45
4	4,76	18,30	1,74	97,70
10	2,00	24,60	2,35	95,36
40	0,43	329,60	31,43	63,93
100	0,149	123,60	11,78	52,15
200	0,074	60,80	5,80	46,35
PASA 200	...	485,86		
TOTAL		1048,56		

W suelo inicial seco : 1.048,80 grs
 W suelo despues de lavado: 563,40 grs
 Porcentaje de error : 0,02 %



GRAVA: 2,30
 ARENA: 51,35
 FINOS: 46,35

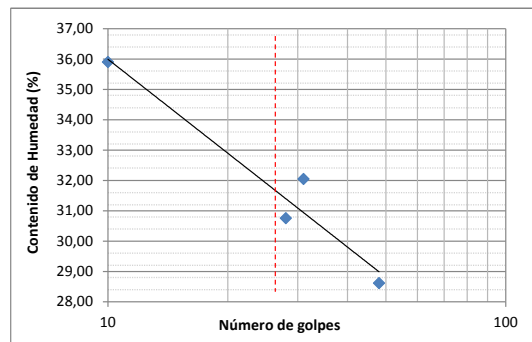
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 33,331354

Tara No.	11	12	13	14
W Tara + S. Hum.	24,15	27,93	26,98	23,20
W tara + S. Seco	19,44	21,87	21,33	17,85
W tara	2,98	2,96	2,96	2,95
W Suelo Seco	16,46	18,91	18,37	14,90
W Agua	4,71	6,06	5,65	5,35
Humedad %	28,61	32,05	30,76	35,91
No. de Golpes	48	31	28	10

LIMITE PLASTICO 26,568087

Tara No.	10	9		
W tara + S Hum.	12,28	12,27		
W tara + S. Seco	10,08	10,24		
W tara	2,20	2,19		
W Suelo Seco	7,88	8,05		
W Agua	2,20	2,03		
Humedad %	27,92	25,22		26,57



LIMITE LIQUIDO: 33,33
 LIMITE PLASTICO: 26,57
 INDICE PLASTICO: 6,76
 ASTM: SC-SM
 AASTHO: A-4
 CLASIFICACION: ARENA LIMO ARCILLOSA

DÍA 14 DE CURADO LA MUESTRA SE COMPORTA DE MANERA NO PLASTICA. NP



Laboratorio de suelos y pavimentos

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

SITIO : El Portugal-Vía Barranca

FECHA : 02/04/2014

MUESTRA : Kip

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

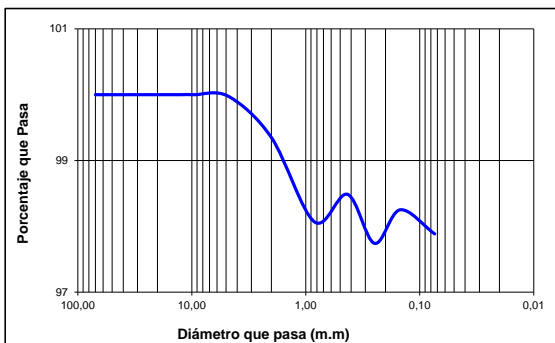
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
W tara + S. Seco : 80,20
W tara : 5,70
W Suelo Seco : 74,50
W Agua : 26,30
Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

W suelo inicial seco : 766,00 grs
W suelo despues de lavado: 28,60 grs
Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
ARENA: 2,09
FINOS: 97,89

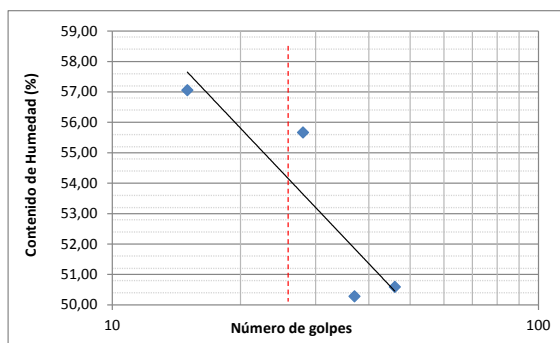
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 56,36460699

Tara No.	21	26	7	4
W Tara + S. Hum.	23,34	38,85	35,66	39,17
W tara + S. Seco	17,80	28,24	25,40	27,49
W tara	6,85	7,14	6,97	7,02
W Suelo Seco	10,95	21,10	18,43	20,47
W Agua	5,54	10,61	10,26	11,68
Humedad %	50,59	50,28	55,67	57,06
No. de Golpes	46	37	28	15

LIMITE PLASTICO

Tara No.	2	20		
W tara + S Hum.	16,96	16,50		
W tara + S. Seco	14,01	13,82		
W tara	6,71	7,04		
W Suelo Seco	7,30	6,78		
W Agua	2,95	2,68		
Humedad %	40,41	39,53		39,97



LIMITE LIQUIDO: 56,36
LIMITE PLASTICO: 39,97
INDICE PLASTICO: 16,40
ASTM: CH
AASTHO: A-7
CLASIFICACION: LIMO ELASTICO ARENOSO

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : El Portugal-Via Barranca
 MUESTRA : Kip-#1 Lutita 0,5+ Cemento 0,5
 TIEMPO : 7 días

FECHA : 08-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

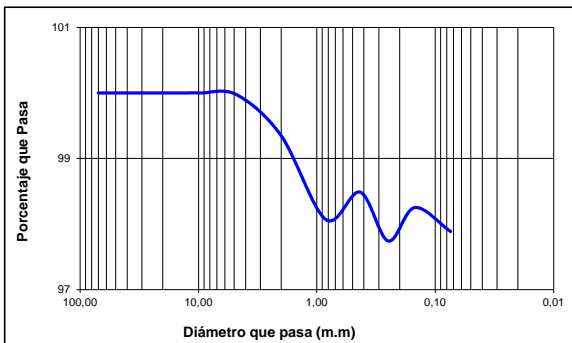
LIMITE LIQUIDO 37,025623

Tara No.	36	35	32	34
W Tara + S. Hum.	24,59	19,34	21,06	21,56
W tara + S. Seco	19,53	14,84	16,24	16,57
W tara	2,91	2,93	2,95	2,96
W Suelo Seco	16,62	11,91	13,29	13,61
W Agua	5,06	4,50	4,82	4,99
Humedad %	30,45	37,78	36,27	36,66
No. de Golpes	48	33	25	15

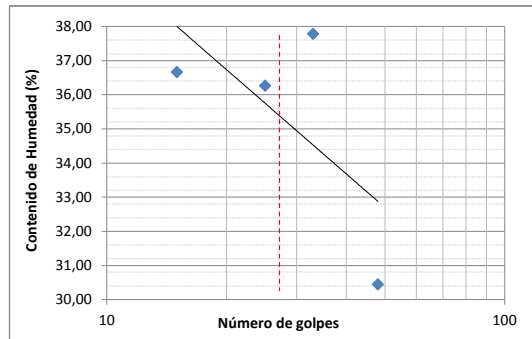
LIMITE PLASTICO 31,977095

Tara No.	7	8		
W tara + S Hum.	10,19	10,42		
W tara + S. Seco	8,46	8,23		
W tara	2,20	2,20		
W Suelo Seco	6,26	6,03		
W Agua	1,73	2,19		
Humedad %	27,64	36,32		31,98

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
ARENA: 2,09
FINOS: 97,89



LIMITE LIQUIDO: 37,03

LIMITE PLASTICO: 31,98

INDICE PLASTICO: 5,05

ASTM CL-ML

AASTHO A-4

CLASIFICACION: ARCILLA LIMOSA ARENOSA

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : El Portugal-Via Barranca
 MUESTRA : Kip-#2 Lutita 0,5+ Cemento 1
 TIEMPO : 7 días

FECHA : 08-abr-14
 ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

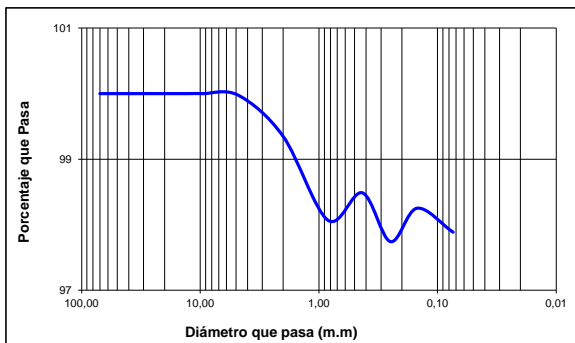
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
ARENA: 2,09
FINOS: 97,89

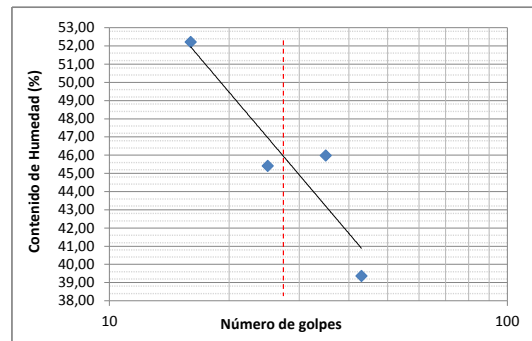
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 45,699638

Tara No.	29	28	27	26
W Tara + S. Hum.	20,70	19,59	23,17	19,89
W tara + S. Seco	15,68	14,38	16,88	14,12
W tara	2,93	3,05	3,03	3,07
W Suelo Seco	12,75	11,33	13,85	11,05
W Agua	5,02	5,21	6,29	5,77
Humedad %	39,37	45,98	45,42	52,22
No. de Golpes	43	35	25	16

LIMITE PLASTICO 35,195503

Tara No.	5	6		
W tara + S Hum.	10,18	10,43		
W tara + S. Seco	8,08	8,30		
W tara	2,16	2,20		
W Suelo Seco	5,92	6,10		
W Agua	2,10	2,13		
Humedad %	35,47	34,92		35,20



LIMITE LIQUIDO: 45,70
LIMITE PLASTICO: 35,20
INDICE PLASTICO: 10,50
ASTM: CL
AASTHO: A-7
CLASIFICACION: ARCILLA LIGERA ARENOSA

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

SITIO : El Portugal-Vía Barranca

MUESTRA : Kip-#3 Lutita 1+ Cemento 0,5

TIEMPO : 7 días

FECHA : 08-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50

W tara + S. Seco : 80,20

W tara : 5,70

W Suelo Seco : 74,50

W Agua : 26,30

Humedad Natural % : 35,30

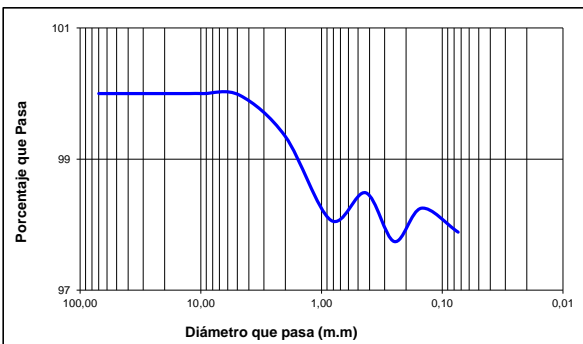
ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

W suelo inicial seco : 766,00 grs

W suelo despues de lavado: 28,60 grs

Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03

ARENA: 2,09

FINOS: 97,89

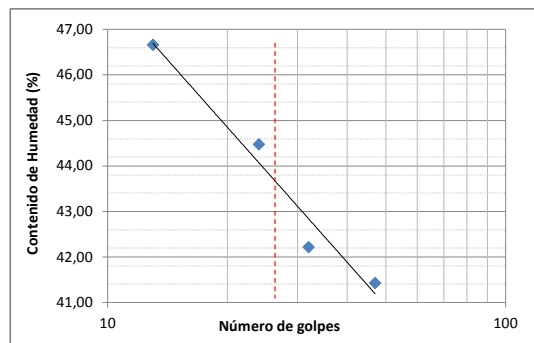
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 43,349506

Tara No.	24	23	18	17
W Tara + S. Hum.	20,97	21,10	21,78	24,93
W tara + S. Seco	15,70	15,70	15,98	17,94
W tara	2,98	2,91	2,94	2,96
W Suelo Seco	12,72	12,79	13,04	14,98
W Agua	5,27	5,40	5,80	6,99
Humedad %	41,43	42,22	44,48	46,66
No. de Golpes	47	32	24	13

LIMITE PLASTICO 34,135472

Tara No.	21	22		
W tara + S Hum.	10,91	10,53		
W tara + S. Seco	8,92	8,57		
W tara	2,95	2,96		
W Suelo Seco	5,97	5,61		
W Agua	1,99	1,96		
Humedad %	33,33	34,94		34,14



LIMITE LIQUIDO: 43,35

LIMITE PLASTICO: 34,14

INDICE PLASTICO: 9,21

ASTM: CL

AASTHO: A-5

CLASIFICACION: ARCILLA LIGERA
ARENOSA

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : El Portugal-Via Barranca
 MUESTRA : Kip-#4 Lutita 1+ Cemento 1
 TIEMPO : 7 días

FECHA : 08-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
2 1/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1*	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

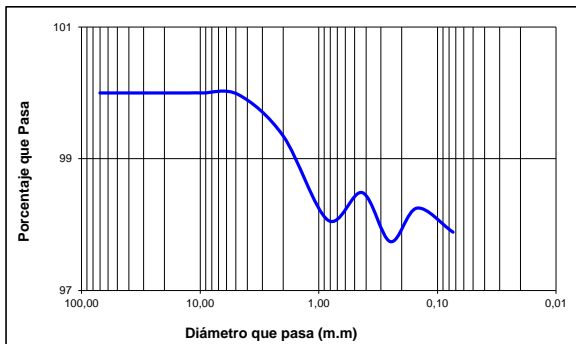
LIMITE LIQUIDO 39,149117

Tara No.	33	31	30	25
W Tara + S. Hum.	21,33	17,72	19,84	22,20
W tara + S. Seco	16,84	13,46	15,54	16,32
W tara	2,98	2,98	2,95	3,00
W Suelo Seco	13,86	10,48	12,59	13,32
W Agua	4,49	4,26	4,30	5,88
Humedad %	32,40	40,65	34,15	44,14
No. de Golpes	43	38	28	15

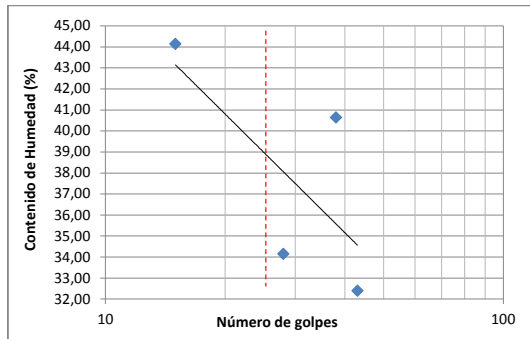
LIMITE PLASTICO 35,501157

Tara No.	9	10		
W tara + S Hum.	10,21	10,70		
W tara + S. Seco	8,02	8,57		
W tara	2,19	2,20		
W Suelo Seco	5,83	6,37		
W Agua	2,19	2,13		
Humedad %	37,56	33,44		35,50

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
 ARENA: 2,09
 FINOS: 97,89



LIMITE LIQUIDO: 39,15
 LIMITE PLASTICO: 35,50
 INDICE PLASTICO: 3,65
 ASTM: ML
 AASTHO: A-4
 CLASIFICACION: LIMO ARENOSO

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : El Portugal-Vía Barranca
 MUESTRA : Kip-#1* Lutita al 0,5
 TIEMPO : 7 días

FECHA : 08-abr-14
 ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
 Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

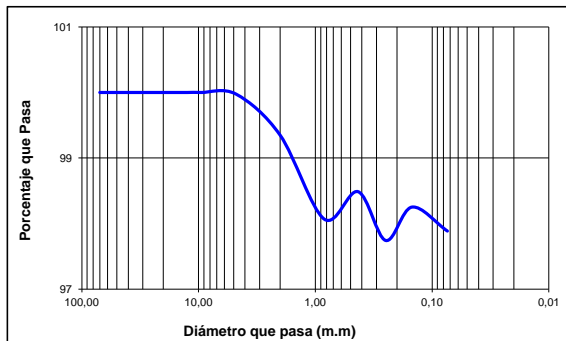
LIMITE LIQUIDO 46,802945

Tara No.	12	13	14	11
W Tara + S. Hum.	20,52	20,60	20,57	21,86
W tara + S. Seco	15,09	15,10	14,86	15,41
W tara	3,00	2,98	3,02	3,01
W Suelo Seco	12,09	12,12	11,84	12,40
W Agua	5,43	5,50	5,71	6,45
Humedad %	44,91	45,38	48,23	52,02
No. de Golpes	50	39	22	13

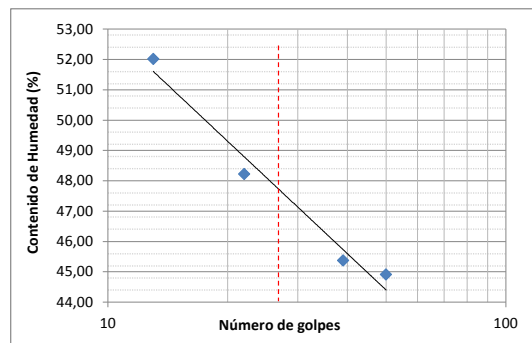
LIMITE PLASTICO 33,784699

Tara No.	1	2		
W tara + S Hum.	10,25	10,62		
W tara + S. Seco	8,22	8,47		
W tara	2,14	2,18		
W Suelo Seco	6,08	6,29		
W Agua	2,03	2,15		
Humedad %	33,39	34,18		33,78

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
 ARENA: 2,09
 FINOS: 97,89



LIMITE LIQUIDO: 46,80
LIMITE PLASTICO: 33,78
INDICE PLASTICO: 13,02
ASTM: CL
AASTHO: A-7
CLASIFICACION: Arcilla ligera arenosa

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : El Portugal-Via Barranca
 MUESTRA : Kip-#2* Lutita al 1
 TIEMPO : 7 días

 FECHA : 08-abr-14

 ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

INV. E - 122
 W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
 Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1*	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

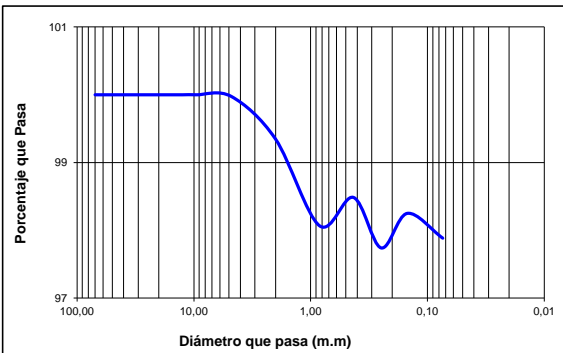
LIMITE LIQUIDO 50,755921

Tara No.	15	19	20	16
W Tara + S. Hum.	20,61	20,62	23,13	21,00
W tara + S. Seco	14,92	14,90	16,15	14,76
W tara	3,08	3,05	3,04	3,03
W Suelo Seco	11,84	11,85	13,11	11,73
W Agua	5,69	5,72	6,98	6,24
Humedad %	48,06	48,27	53,24	53,20
No. de Golpes	43	32	20	16

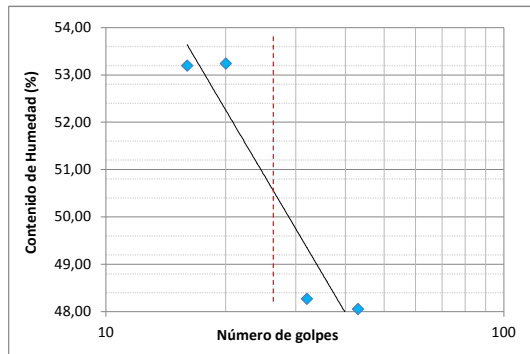
LIMITE PLASTICO 34,955973

Tara No.	3	4		
W tara + S Hum.	10,23	10,60		
W tara + S. Seco	8,12	8,44		
W tara	2,17	2,17		
W Suelo Seco	5,95	6,27		
W Agua	2,11	2,16		
Humedad %	35,46	34,45		34,96

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
ARENA: 2,09
FINOS: 97,89



LIMITE LIQUIDO: 50,76
LIMITE PLASTICO: 34,96
INDICE PLASTICO: 15,80
ASTM: CH
AASTHO: A-7
CLASIFICACION: LIMO ELASTICO ARENOSO



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
 MUESTRA : Kip-#1 Lutita 0,5+ Cemento 0,5
 TIEMPO : 14 días

FECHA : 15-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

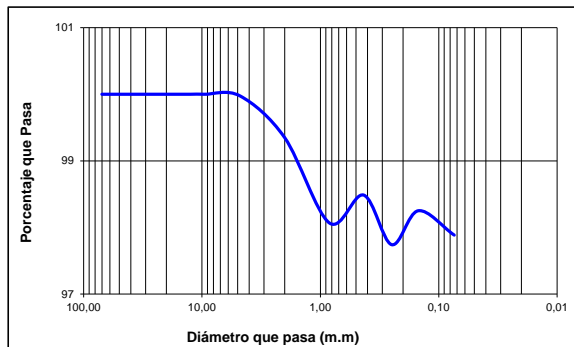
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
 Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
 ARENA: 2,09
 FINOS: 97,89

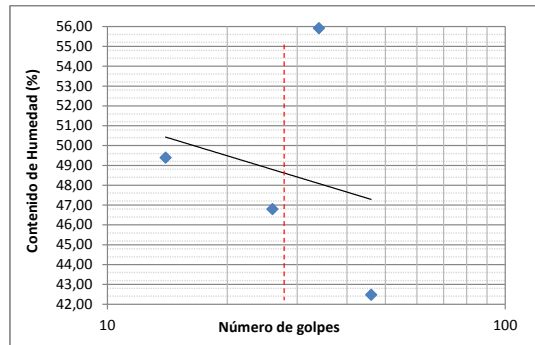
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 48,096231

Tara No.	25	14	12	15
W Tara + S. Hum.	24,90	26,90	26,10	28,00
W tara + S. Seco	18,40	18,40	18,80	19,80
W tara	3,10	3,20	3,20	3,20
W Suelo Seco	15,30	15,20	15,60	16,60
W Agua	6,50	8,50	7,30	8,20
Humedad %	42,48	55,92	46,79	49,40
No. de Golpes	46	34	26	14

LIMITE PLASTICO 38,9881

Tara No.	5	6		
W tara + S Hum.	13,50	11,80		
W tara + S. Seco	10,00	9,40		
W tara	2,16	2,20		
W Suelo Seco	7,84	7,20		
W Agua	3,50	2,40		
Humedad %	44,64	33,33		38,99



LIMITE LIQUIDO: 48,10

LIMITE PLASTICO: 38,99

INDICE PLASTICO: 9,11

ASTM CL

AASTHO A-5

CLASIFICACION: ARENA LIMOSA



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
 MUESTRA : Kip-#2 Lutita 0,5+ Cemento 1
 TIEMPO : 14 días

FECHA : 15-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
 Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

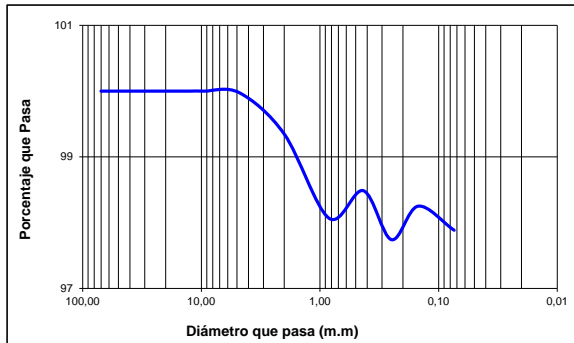
LIMITE LIQUIDO 50,38493

Tara No.	16	20	19	11
W Tara + S. Hum.	27,10	28,20	30,50	25,60
W tara + S. Seco	19,70	19,60	21,50	17,70
W tara	3,00	3,10	3,00	3,10
W Suelo Seco	16,70	16,50	18,50	14,60
W Agua	7,40	8,60	9,00	7,90
Humedad %	44,31	52,12	48,65	54,11
No. de Golpes	48	32	21	13

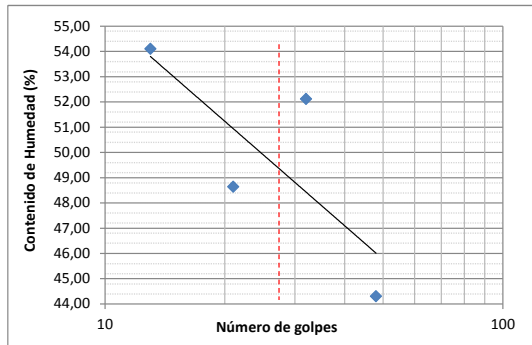
LIMITE PLASTICO 32,03994

Tara No.	7	8		
W tara + S Hum.	13,60	14,30		
W tara + S. Seco	10,80	11,40		
W tara	2,20	2,20		
W Suelo Seco	8,60	9,20		
W Agua	2,80	2,90		
Humedad %	32,56	31,52		32,04

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0.03
 ARENA: 2.09
 FINOS: 97.89



LIMITE LIQUIDO: 50,38

LIMITE PLASTICO: 32,04

INDICE PLASTICO: 18,34

ASTM: CH

AASTHO: A-7

CLASIFICACION: LIMO ELASTICO ARENOSO



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
 MUESTRA : Kip-#3 Lutita 1+ Cemento 0,5
 TIEMPO : 14 días

FECHA : 15-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
 Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

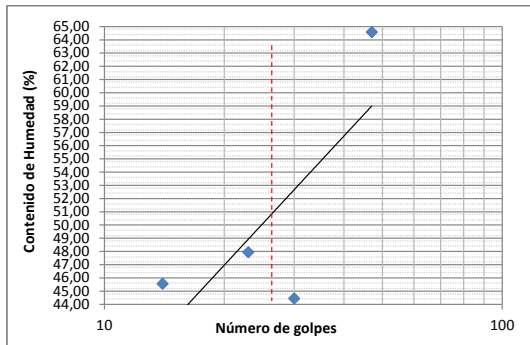
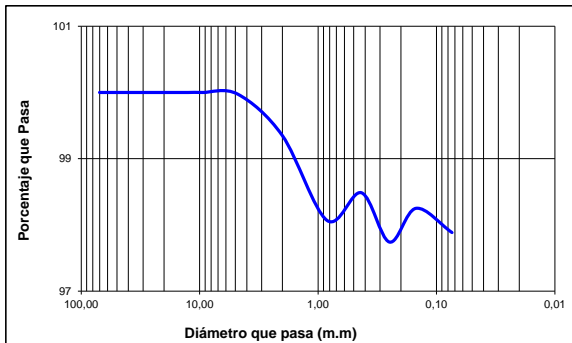
LIMITE LIQUIDO 46,194825

Tara No.	26	28	29	34
W Tara + S. Hum.	26,90	28,90	24,70	27,70
W tara + S. Seco	17,60	20,90	17,70	20,00
W tara	3,20	2,90	3,10	3,10
W Suelo Seco	14,40	18,00	14,60	16,90
W Agua	9,30	8,00	7,00	7,70
Humedad %	64,58	44,44	47,95	45,56
No. de Golpes	47	30	23	14

LIMITE PLASTICO 42,13503

Tara No.	9	10		
W tara + S Hum.	13,80	14,20		
W tara + S. Seco	10,40	10,60		
W tara	2,19	2,20		
W Suelo Seco	8,21	8,40		
W Agua	3,40	3,60		
Humedad %	41,41	42,86		42,14

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
 ARENA: 2,09
 FINOS: 97,89

LIMITE LIQUIDO: 46,19
 LIMITE PLASTICO: 42,14
 INDICE PLASTICO: 4,06
 ASTM: CL-ML
 AASTHO: A-5
 CLASIFICACION: ARCILLA LIMOSA ARENOSA



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
 MUESTRA : Kip-#4 Lutita 1+ Cemento 1
 TIEMPO : 14 días

FECHA : 15-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

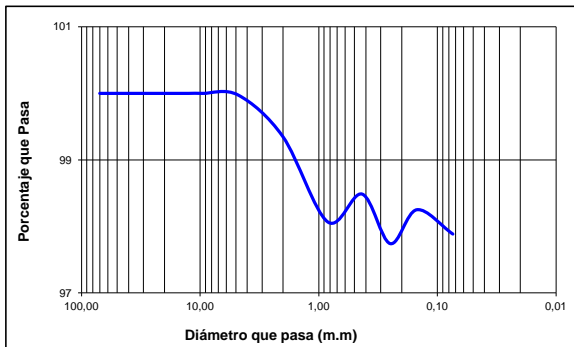
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
 Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
 ARENA: 2,09
 FINOS: 97,89

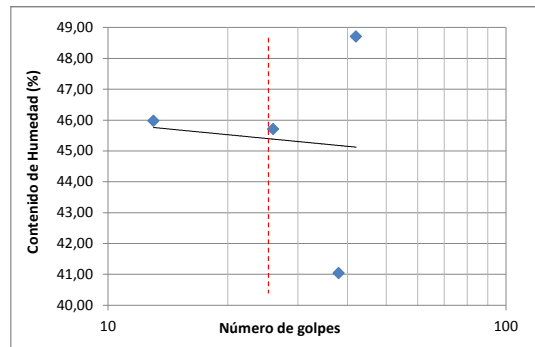
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 45,845649

Tara No.	13	36	35	32
W Tara + S. Hum.	25,50	27,50	28,50	28,50
W tara + S. Seco	18,13	20,40	20,50	20,50
W tara	3,00	3,10	3,00	3,10
W Suelo Seco	15,13	17,30	17,50	17,40
W Agua	7,37	7,10	8,00	8,00
Humedad %	48,71	41,04	45,71	45,98
No. de Golpes	42	38	26	13

LIMITE PLASTICO 38,5932

Tara No.	21	27		
W tara + S Hum.	15,60	15,20		
W tara + S. Seco	12,20	11,70		
W tara	3,00	3,00		
W Suelo Seco	9,20	8,70		
W Agua	3,40	3,50		
Humedad %	36,96	40,23		38,59



LIMITE LIQUIDO: 45,85
 LIMITE PLASTICO: 38,59
 INDICE PLASTICO: 7,25
 ASTM: CL
 AASTHO: A-5
 CLASIFICACION: ARCILLA LIGERA ARENOSA



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
 SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
 MUESTRA : Kip-#1* Lutita al 0,5
 TIEMPO : 14 días

FECHA : 15-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
 Nathalia Mantilla

INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
 W tara + S. Seco : 80,20
 W tara : 5,70
 W Suelo Seco : 74,50
 W Agua : 26,30
 Humedad Natural % : 35,30

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

No.	Tamiz	Peso Retenido	% retenido	% que pasa
	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

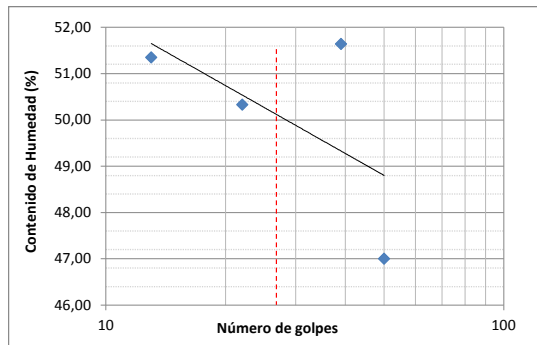
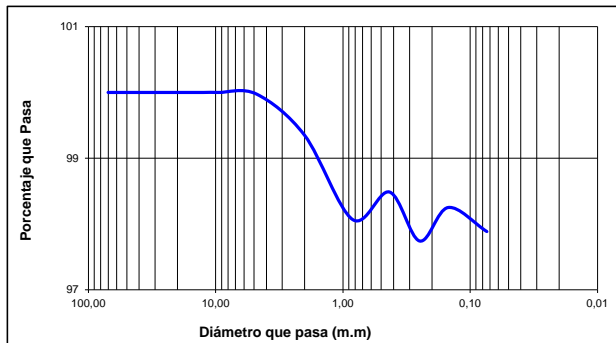
LIMITE LIQUIDO 50,985235

Tara No.	22	24	23	18
W Tara + S. Hum.	17,70	21,80	25,70	25,50
W tara + S. Seco	13,00	15,50	18,10	17,90
W tara	3,00	3,30	3,00	3,10
W Suelo Seco	10,00	12,20	15,10	14,80
W Agua	4,70	6,30	7,60	7,60
Humedad %	47,00	51,64	50,33	51,35
No. de Golpes	50	39	22	13

LIMITE PLASTICO 39,70513

Tara No.	1	2		
W tara + S Hum.	12,70	12,40		
W tara + S. Seco	9,80	9,40		
W tara	2,14	2,18		
W Suelo Seco	7,66	7,22		
W Agua	2,90	3,00		
Humedad %	37,86	41,55		39,71

W suelo inicial seco : 766,00 grs
 W suelo despues de lavado: 28,60 grs
 Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
 ARENA: 2,09
 FINOS: 97,89

LIMITE LIQUIDO: 50,99
 LIMITE PLASTICO: 39,71
 INDICE PLASTICO: 11,28
 ASTM: CH
 AASTHO: A-7
 CLASIFICACION: LIMO ELASTICO ARCILLOSO

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO : Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

SITIO : Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)

MUESTRA : Kip-#2* Lutita al 1

TIEMPO : 14 días

FECHA : 15-abr-14

ELABORÓ: Fernada Ballesteros
Nathalia Mantilla

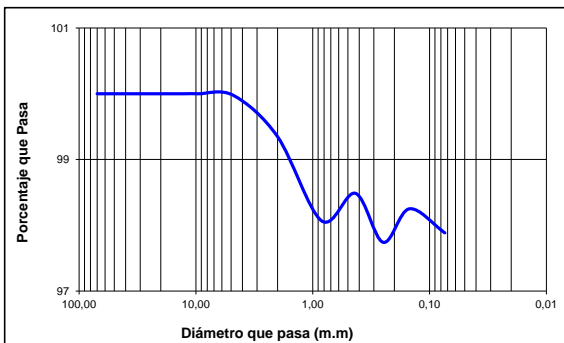
INV. E - 122

W Tara + S. Hum. : 106,50
W tara + S. Seco : 80,20
W tara : 5,70
W Suelo Seco : 74,50
W Agua : 26,30
Humedad Natural % : **35,30**

ENSAYO DE GRANULOMETRIA (GRADACIÓN) (I.N.V. E-123)

Tamiz		Peso Retenido	% retenido	% que pasa
No.	m.m			
3	70,10	0,00	0,00	100,00
21/2	64,00	0,00	0,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	100,00
11/2	37,50	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,50	0,00	0,00	100,00
1/2	12,50	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,20	0,03	99,97
10	2,00	4,80	0,63	99,35
20	0,84	9,80	1,28	98,07
40	0,43	6,60	0,86	98,49
60	0,25	2,50	0,33	97,74
100	0,149	1,80	0,23	98,25
200	0,074	2,80	0,37	97,89
PASA 200	...	737,86		
TOTAL		766,36		

W suelo inicial seco : 766,00 grs
W suelo despues de lavado: 28,60 grs
Porcentaje de error : 0,05 %



GRAVA: 0,03
ARENA: 2,09
FINOS: 97,89

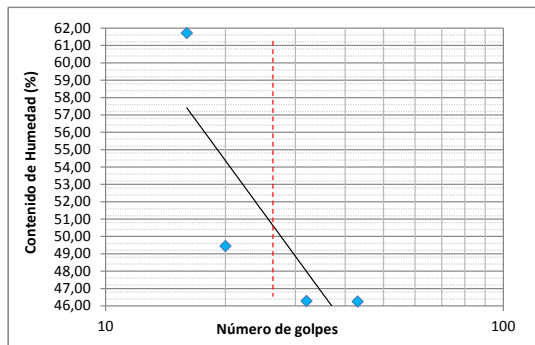
LIMITES DE CONSISTENCIA (ATTEMBERG)

LIMITE LIQUIDO 47,871118

Tara No.	17	30	31	33
W Tara + S. Hum.	20,40	32,40	30,20	29,20
W tara + S. Seco	14,90	23,10	21,20	19,20
W tara	3,01	3,01	3,00	3,00
W Suelo Seco	11,89	20,09	18,20	16,20
W Agua	5,50	9,30	9,00	10,00
Humedad %	46,26	46,29	49,45	61,73
No. de Golpes	43	32	20	16

LIMITE PLASTICO 38,23489

Tara No.	3	4		
W tara + S Hum.	13,50	14,10		
W tara + S. Seco	10,10	11,10		
W tara	2,17	2,17		
W Suelo Seco	7,93	8,93		
W Agua	3,40	3,00		
Humedad %	42,88	33,59		38,23



LIMITE LIQUIDO: 47,87
LIMITE PLASTICO: 38,23
INDICE PLASTICO: 9,64
ASTM: CL
AASTHO: A-5
CLASIFICACION: ARCILLA LIGERA ARENOSA



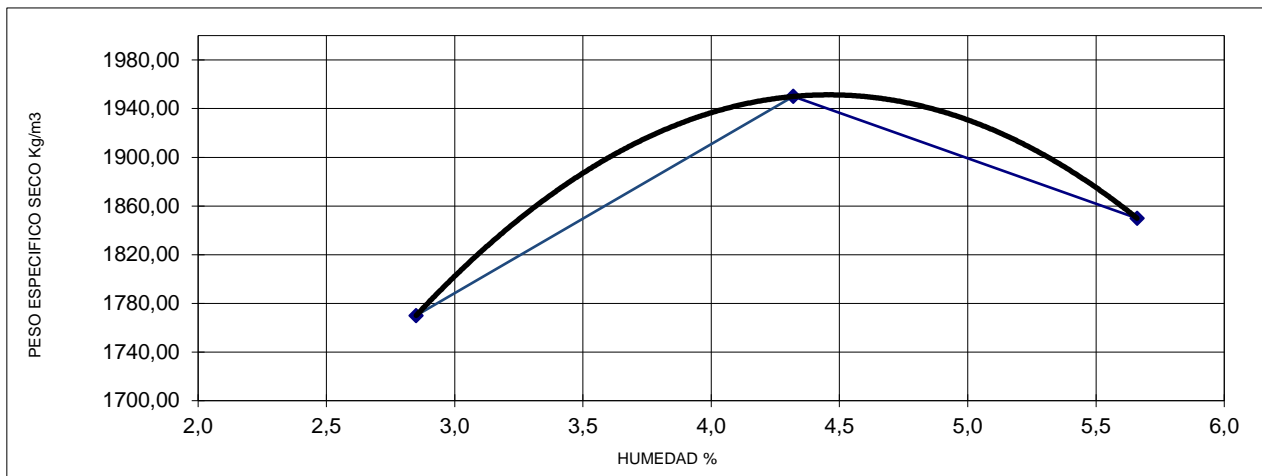
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE COMPACTACION INV-142

FECHA Mayo 20 de 2014
PROYECTO Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION Carreteable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA Qfe
DESCRIPCION Subrasante

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
# GOLPES POR CARA	25
MOLDE No	23
VOL. MOLDE (m3)	0,00094

PESO TARA (Kg)	0,0066	0,0083	0,0083
W TARA + S.H (Kg)	0,0381	0,0599	0,0604
W TARA + S.S (Kg)	0,0364	0,0558	0,0551
PESO AGUA	0,0017	0,0041	0,0053
PESO SOLIDO	0,0298	0,0475	0,0468
HUMEDAD	5,7	8,6	11,3
PROM. HUMEDAD %	2,85	4,32	5,66

PESO MOLDE (Kg)	3,747	3,747	3,747
W MOLDE+S.H (Kg)	5,518	5,748	5,690
W DEL S. H. (Kg)	1,771	2,001	1,943
DENSIDAD H. (Kg/m3)	1880	2120	2060
DENSIDAD S. (Kg/m3)	1770	1950	1850



DEN. MAX. Kg/m3 1950,00
HUM . OPTIMA % 9,0



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
COMPACTACION PARA CBR**

FECHA	Mayo 20 DE 2014
PROYECTO	Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION	Carretable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA	Qfe
DESCRIPCION	Subrasante

MOLDE #	24	8	2
DIAMETRO (m)	0,155	0,158	0,160
ALTURA (m)	0,114	0,109	0,109
VOLUMEN (m3)	0,00214	0,00213	0,00218
N° DE GOLPES	10	30	60

HUMEDAD DE COMPACTACION

PESO TARA (Kg)	0,0080	0,0080	0,0084	0,0084	0,0083	0,0083
W DE TARA + S.HUMEDO (Kg)	0,0731	0,0731	0,0653	0,0653	0,0844	0,0844
W DE TARA + S.SECO (Kg)	0,0677	0,0677	0,0606	0,0606	0,0781	0,0781
PESO DE AGUA	0,0054	0,0054	0,0047	0,0047	0,0063	0,0063
PESO SUELO SECO	0,0597	0,0597	0,0522	0,0522	0,0698	0,0698
HUMEDAD EN %	9,05	9,05	9,0	9,0	9,0	9,0
PROMEDIO HUMEDAD EN %	9,0		9,0		9,0	

CONTENIDO DE HUMEDAD %	9,0	9,0	9,0
W MOLDE + S.HUMEDO (Kg)	11,3	11,7	11,7
PESO MOLDE (Kg)	7,0	7,3	7,1
W SUELO EN EL MOLDE (Kg)	4,3	4,4	4,6
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m3)	2015	2087	2129
DENSIDAD SECA (Kg/m3)	1848	1915	1952

HUMEDAD DE PENETRACION

PESO TARA (Kg)	0,0082	0,0082	0,0089	0,0089	0,0085	0,0085
W TARA + S.H. (Kg)	0,0651	0,0651	0,0526	0,0526	0,0564	0,0564
W TARA + S.SECO (Kg)	0,0558	0,0558	0,0463	0,0463	0,0501	0,0501
PESO DE AGUA	0,0093	0,0093	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063
PESO SUELO SECO	0,0476	0,0476	0,0374	0,0374	0,0416	0,0416
HUMEDAD EN %	19,54	19,54	16,8	16,8	15,1	15,1
PROM. HUMEDAD EN %	19,5		16,8		15,1	



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA Mayo 20 de 2014

PROYECTO Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

LOCALIZACION Carreteable que conduce a la Turena (Floridablanca)

MUESTRA Qfe

DESCRIPCION Subrasante

MOLDE No	24			8			2		
No DE GOLPES	10			30			60		
DIAS DE INMERSION	4			4			4		
PENETRACION (mm)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)
0,0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
0,6	4	0,04	0,029	9	0,09	0,06	39	0,38	0,27
1,3	10	0,10	0,068	29	0,28	0,20	65	0,64	0,46
1,9	15	0,15	0,107	49	0,48	0,34	97	0,95	0,68
2,5	21	0,21	0,150	68	0,67	0,48	126	1,24	0,89
3,8	27	0,26	0,182	83	0,81	0,58	161	1,58	1,13
5,1	31	0,30	0,214	94	0,92	0,66	203	1,99	1,42
6,4	41	0,40	0,286	120	1,18	0,84	256	2,51	1,79
7,6	51	0,50	0,357	145	1,42	1,02	312	3,06	2,19
10,2	74	0,73	0,522	220	2,16	1,54	440	4,32	3,09
12,7	96	0,94	0,672	294	2,88	2,06	575	5,63	4,04
CBR A 0.1"	2			7			13		
CBR A 0.2"	2			6			14		
CBR CORR. 0.1"	2			7			13		
CBR CORR. 0.2"	2			6			14		
EXPANSION (mm)	1,75			2,17			2,67		
EXPANSION (%)	1,4			1,72			2,1		

%Densidad max	DENSIDAD	CBR(%)
95%	1755,60	3
98%	1876,70	6
100%	1952,00	14



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA
PROYECTO

Mayo 27 DE 2014

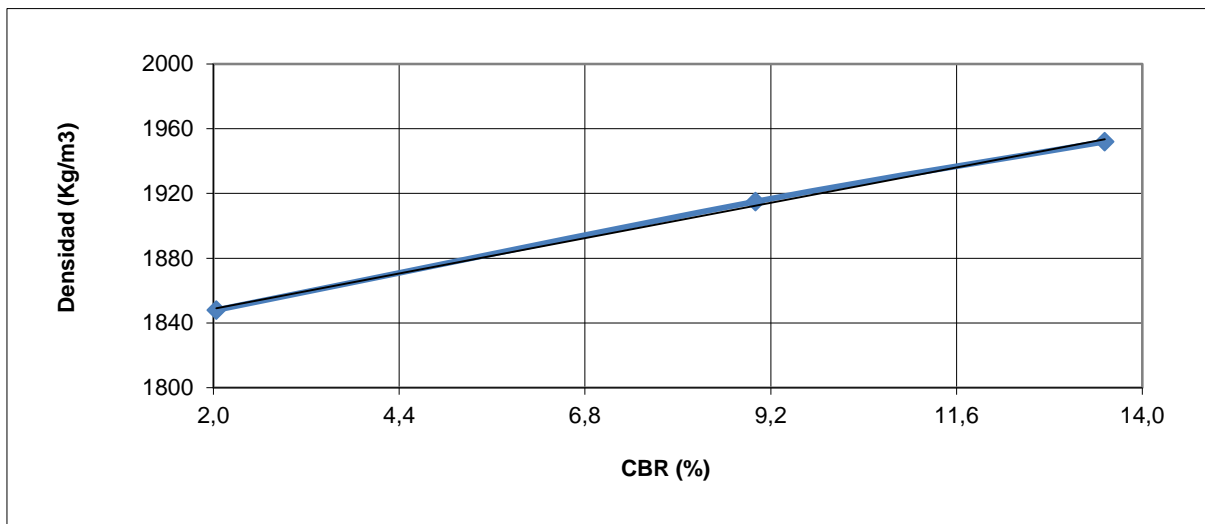
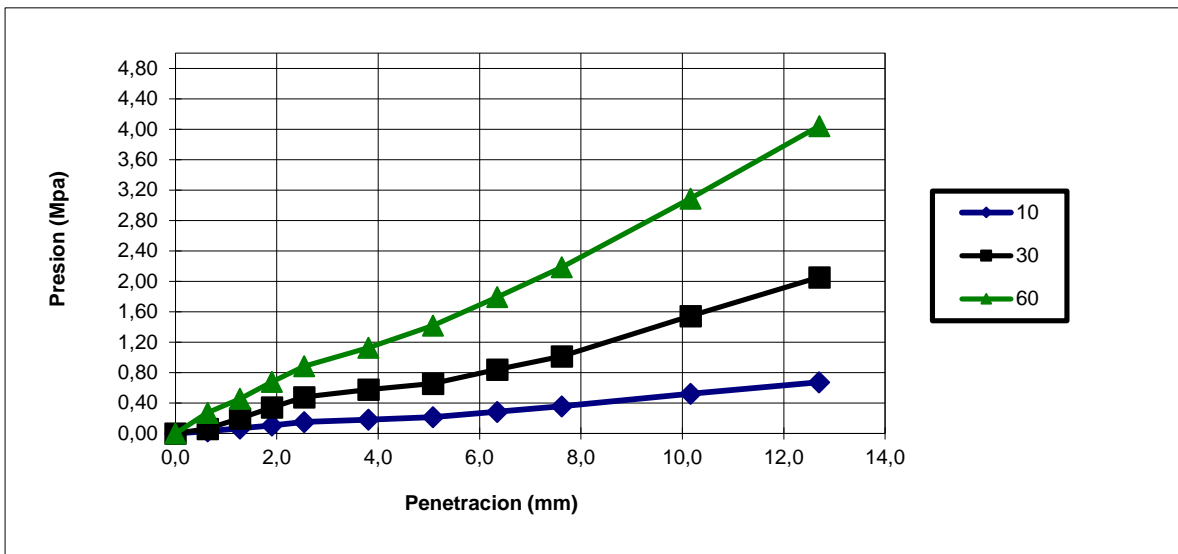
Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como
estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

LOCALIZACION
MUESTRA
DESCRIPCION

Carreteable que conduce a la Turena (Floridablanca)

Qfe

Subrasante





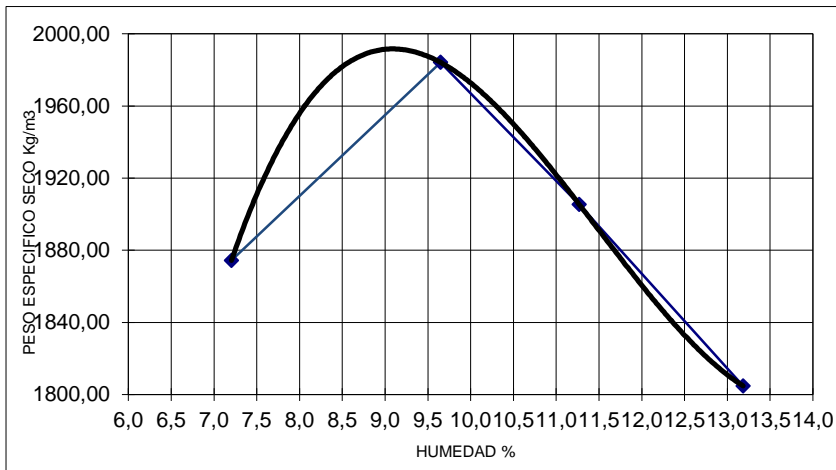
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
 ENSAYO DE COMPACTACION INV-142**

FECHA Mayo 27 de 2014
PROYECTO Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en
LOCALIZACION Carreteable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA Qfe-#4 Lutita 1+ Cemento 1
DESCRIPCION Subrasante

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
# GOLPES POR CARA	25
MOLDE No	23
DIAMETRO MOLDE(m)	0,10
ALTURA MOLDE (m)	0,12
VOL. MOLDE (m3)	0,00090

PESO TARA (Kg)	0,0076	0,0069	0,0072	0,0068	0,0069	0,0068	0,0066	0,0068
W TARA + S.H (Kg)	0,0505	0,0503	0,0507	0,0508	0,0504	0,0502	0,0501	0,0509
W TARA + S.S (Kg)	0,0476	0,0474	0,0469	0,0469	0,0460	0,0458	0,0455	0,0453
PESO AGUA	0,0029	0,0029	0,0038	0,0039	0,0044	0,0044	0,0046	0,0056
PESO SOLIDO	0,0400	0,0405	0,0397	0,0401	0,0391	0,0390	0,0389	0,0385
HUMEDAD	7,3	7,2	9,6	9,7	11,3	11,3	11,8	14,5
PROM. HUMEDAD %	7,21		9,65		11,27		13,19	

PESO MOLDE (Kg)	4,285	4,285	4,285	4,285
W MOLDE+S.H (Kg)	6,100	6,250	6,200	6,130
W DEL S. H. (Kg)	1,815	1,965	1,915	1,845
DENSIDAD H. (Kg/m3)	2009	2176	2120	2043
DENSIDAD S. (Kg/m3)	1874	1984	1906	1805



DEN. MAX. Kg/m3 1990,00
HUM . OPTIMA % 9,5



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
COMPACTACION PARA CBR**

FECHA	Mayo 27 de 2014
PROYECTO	Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION	Carreteable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA	Qfe-#4 Lutita 1+ Cemento 1
DESCRIPCION	Subrasante

MOLDE #	1	2	3
DIAMETRO (m)	0,150	0,150	0,150
ALTURA (m)	0,125	0,125	0,125
VOLUMEN (m3)	0,00221	0,00221	0,00221
N° DE GOLPES	12	26	55

HUMEDAD DE COMPACTACION

PESO TARA (Kg)	0,0070	0,0069	0,0068	0,0069	0,0070	0,0067
W DE TARA + S.HUMEDO (Kg)	0,0503	0,0505	0,0506	0,0502	0,0508	0,0504
W DE TARA + S.SECO (Kg)	0,0466	0,0467	0,0465	0,0467	0,0470	0,0466
HUMEDAD EN %	9,34	9,55	10,3	8,8	9,5	9,5
PROMEDIO HUMEDAD EN %	9,4		9,6		9,5	

CONTENIDO DE HUMEDAD %	9,4	9,6	9,5
W MOLDE + S.HUMEDO (Kg)	12,9	13,2	13,7
PESO MOLDE (Kg)	9,1	9,0	9,1
W SUELO EN EL MOLDE (Kg)	3,8	4,3	4,6
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m3)	1741	1931	2060
DENSIDAD SECA (Kg/m3)	1590	1762	1881

HUMEDAD DE PENETRACION

PESO TARA (Kg)	0,0069	0,0069	0,0072	0,0069	0,0068	0,0068
W TARA + S.H. (Kg)	0,0470	0,0477	0,0476	0,0472	0,0478	0,0471
W TARA + S.SECO (Kg)	0,0409	0,0416	0,0426	0,0421	0,0432	0,0424
HUMEDAD EN %	17,94	17,58	14,1	14,5	12,6	13,2
PROM. HUMEDAD EN %	17,8		14,3		12,9	



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA	Mayo 27 DE 2014
PROYECTO	Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION	Carreteable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA	Qfe-#4 Lutita 1+ Cemento 1
DESCRIPCION	Subrasante

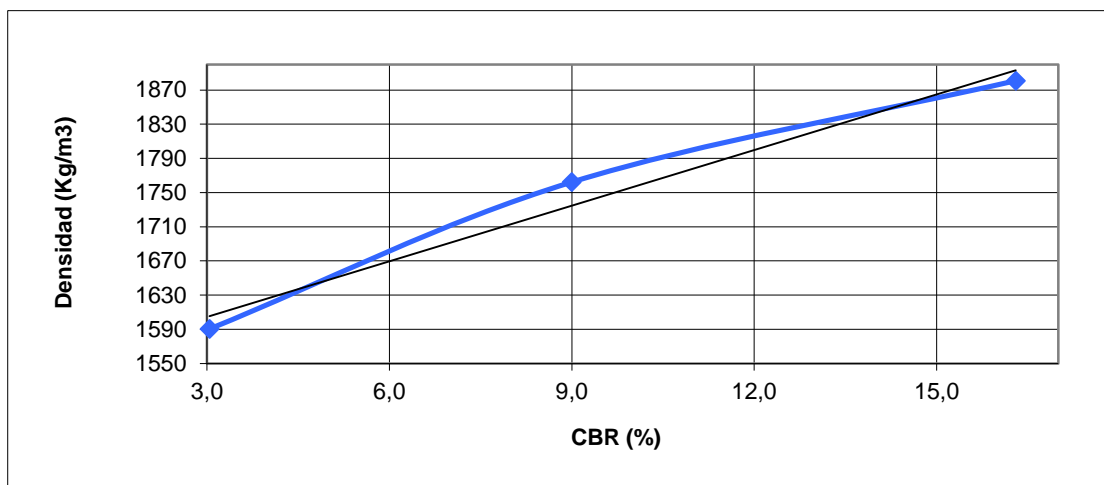
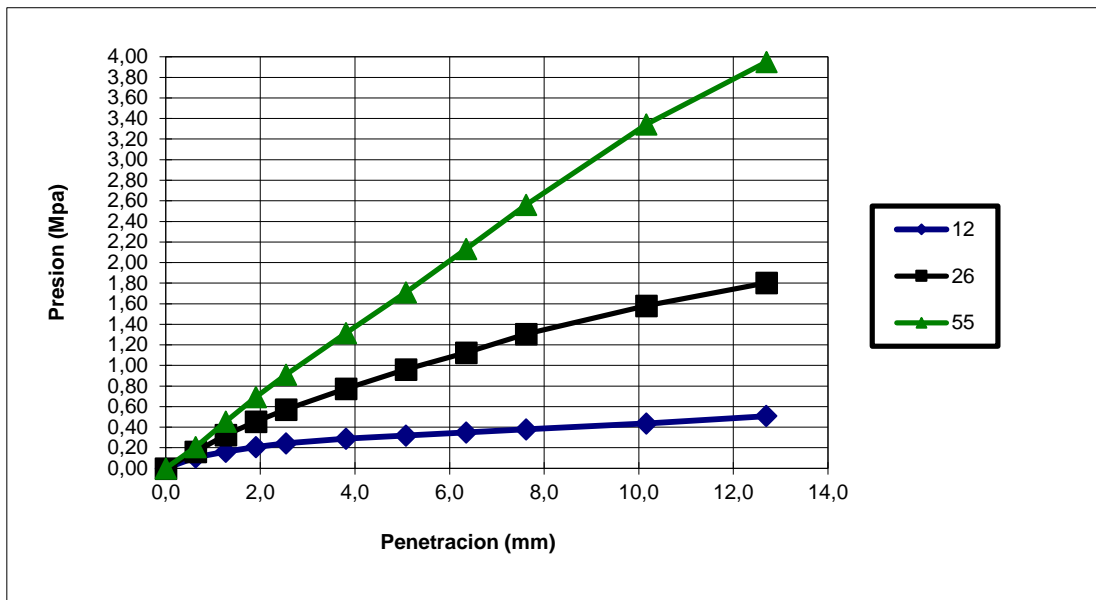
MOLDE No	10			11			12		
No DE GOLPES	12			26			55		
DIAS DE INMERSION	4			4			4		
PENETRACION (mm)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)
0,0	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00
0,6	21	0,2	0,11	32	0,3	0,16	41	0,4	0,21
1,3	32	0,3	0,16	64	0,6	0,32	90	0,9	0,46
1,9	41	0,4	0,21	90	0,9	0,46	137	1,3	0,69
2,5	48	0,5	0,24	113	1,1	0,57	180	1,8	0,91
3,8	57	0,6	0,29	153	1,5	0,77	260	2,5	1,32
5,1	63	0,6	0,32	190	1,9	0,96	338	3,3	1,71
6,4	69	0,7	0,35	222	2,2	1,12	421	4,1	2,13
7,6	75	0,7	0,38	258	2,5	1,31	506	5,0	2,56
10,2	86	0,8	0,44	312	3,1	1,58	660	6,5	3,34
12,7	100	1,0	0,51	356	3,5	1,80	780	7,6	3,95
CBR A 0.1"	4			8			13		
CBR A 0.2"	3			9			16		
CBR CORR. 0.1"	4			8			13		
CBR CORR. 0.2"	3			9			16		
EXPANSION (mm)	2,13			2,54			3,05		
EXPANSION (%)	1,7			2,02			2,4		

%Densidad max	DENSIDAD	CBR(%)
95%	1510,50	3
98%	1726,76	9
100%	1880,90	16



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA Mayo 27 de 2014
PROYECTO Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita)
como estabilizador de suelos arcillosos en
Santander.
LOCALIZACION Carreteable que conduce a la Turena (Floridablanca)
MUESTRA Qfe-#4 Lutita 1+ Cemento 1
DESCRIPCION Subrasante





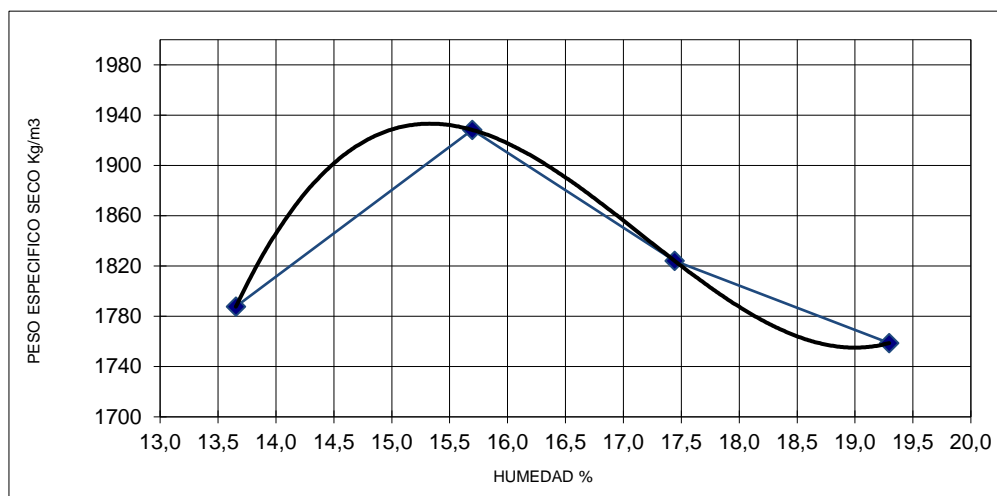
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE COMPACTACION INV-142

FECHA Junio 4 DE 2014
PROYECTO Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION El Portugal-Via Barranca
MUESTRA Kip
DESCRIPCION Subrasante

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
# GOLPES POR CARA	25
MOLDE No	23
DIAMETRO MOLDE(m)	0,10
ALTURA MOLDE (m)	0,12
VOL. MOLDE (m3)	0,00090

PESO TARA (Kg)	0,0068	0,0069	0,0070	0,0072	0,0067	0,0071	0,0068	0,0072
W TARA + S.H (Kg)	0,0503	0,0508	0,0507	0,0505	0,0501	0,0506	0,0504	0,0502
W TARA + S.S (Kg)	0,0451	0,0455	0,0449	0,0445	0,0440	0,0438	0,0436	0,0430
PESO AGUA	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007	0,007	0,007
PESO SOLIDO	0,038	0,039	0,038	0,037	0,037	0,037	0,037	0,036
HUMEDAD	13,6	13,7	15,3	16,1	16,4	18,5	18,5	20,1
PROM. HUMEDAD %	13,65		15,69		17,44		19,29	

PESO MOLDE (Kg)	4,285	4,285	4,285	4,285
W MOLDE+S.H (Kg)	6,120	6,300	6,220	6,180
W DEL S. H. (Kg)	1,835	2,015	1,935	1,895
DENSIDAD H. (Kg/m3)	2032	2231	2142	2098
DENSIDAD S. (Kg/m3)	1788	1928	1824	1759



DEN. MAX. Kg/m3 1935,00
HUM . OPTIMA % 15,5



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
COMPACTACION PARA CBR

FECHA	Junio 4 de 2014
PROYECTO	Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION	El Portugal-Via Barranca
MUESTRA	Kip
DESCRIPCION	Subrasante

MOLDE #	1	2	3
DIAMETRO (m)	0,150	0,150	0,150
ALTURA (m)	0,125	0,125	0,125
VOLUMEN (m ³)	0,00221	0,00221	0,00221
Nº DE GOLPES	12	26	55

HUMEDAD DE COMPACTACION

PESO TARA (Kg)	0,0069	0,0068	0,0071	0,0070	0,0067	0,0069
W DE TARA + S.HUMED	0,0509	0,0505	0,0507	0,0504	0,0508	0,0503
W DE TARA + S.SECO (Kg)	0,0450	0,0447	0,0449	0,0447	0,0445	0,0447
PESO DE AGUA	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
PESO SUELO SECO	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
HUMEDAD EN %	15,49	15,30	15,3	15,0	16,7	14,8
PROMEDIO HUMEDAD EN %	15,4		15,2		15,7	

CONTENIDO DE HUMEDAD EN %	15,4	15,2	15,7
W MOLDE + S.HUMEDACION	12,8	13,0	13,3
PESO MOLDE (Kg)	9,1	9,0	9,1
W SUELO EN EL MOLDE	3,7	4,0	4,2
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m ³)	1686	1806	1906
DENSIDAD SECA (Kg/m ³)	1461	1568	1647

HUMEDAD DE PENETRACION

PESO TARA (Kg)	0,0069	0,0070	0,0071	0,0070	0,0067	0,0069
W TARA + S.H. (Kg)	0,0507	0,0504	0,0508	0,0500	0,0502	0,0506
W TARA + S.SECO (Kg)	0,0380	0,0381	0,0387	0,0381	0,0390	0,0392
PESO DE AGUA	0,0127	0,0123	0,0121	0,0119	0,0112	0,0114
PESO SUELO SECO	0,0311	0,0311	0,0316	0,0311	0,0323	0,0323
HUMEDAD EN %	40,84	39,55	38,3	38,3	34,7	35,3
PROM. HUMEDAD EN %	40,2		38,3		35,0	



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA Junio 4 de 2014
PROYECTO Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION El Portugal-Via Barranca
MUESTRA Kip
DESCRIPCION Subrasante

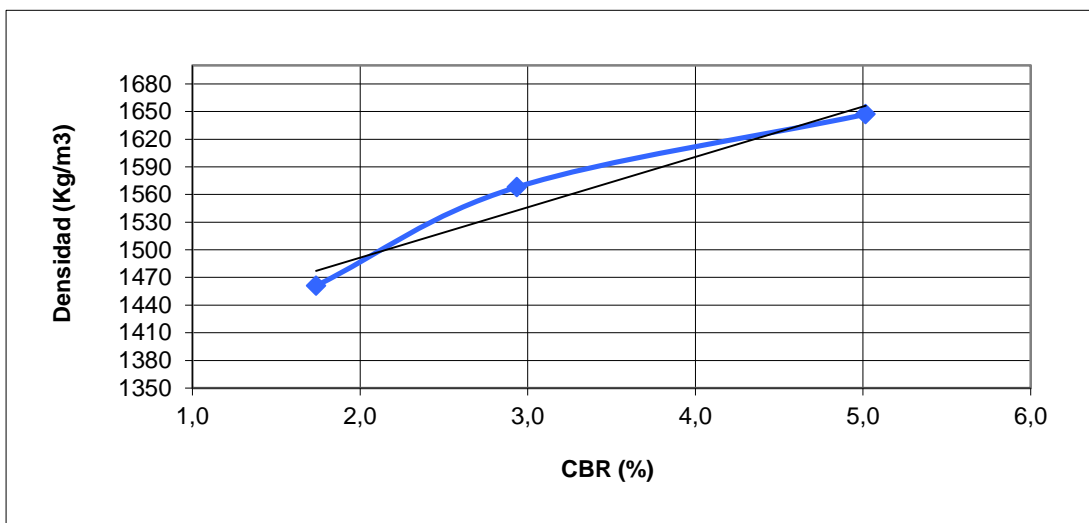
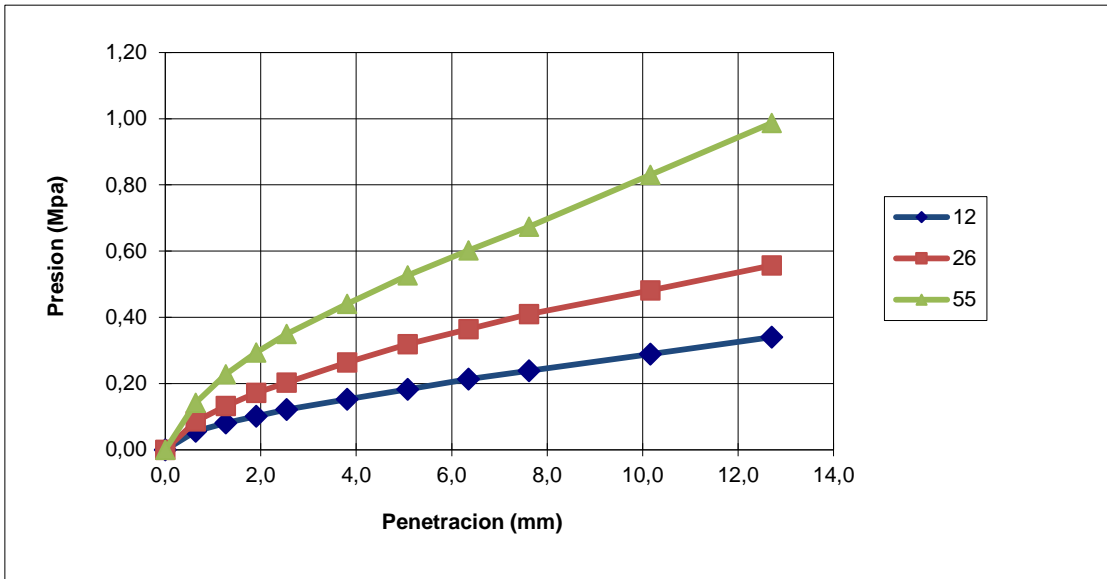
MOLDE No	10			11			12		
No DE GOLPES	12			26			55		
DIAS DE INMERSION	4			4			4		
PENETRACION (mm)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)
0,0	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00
0,6	11	0,1	0,06	17	0,2	0,09	28	0,3	0,14
1,3	16	0,2	0,08	26	0,3	0,13	45	0,4	0,23
1,9	20	0,2	0,10	34	0,3	0,17	58	0,6	0,29
2,5	24	0,2	0,12	40	0,4	0,20	69	0,7	0,35
3,8	30	0,3	0,15	52	0,5	0,26	87	0,9	0,44
5,1	36	0,4	0,18	63	0,6	0,32	104	1,0	0,53
6,4	42	0,4	0,21	72	0,7	0,36	119	1,2	0,60
7,6	47	0,5	0,24	81	0,8	0,41	133	1,3	0,67
10,2	57	0,6	0,29	95	0,9	0,48	164	1,6	0,83
12,7	67	0,7	0,34	110	1,1	0,56	195	1,9	0,99
CBR A 0.1"	2			3			5		
CBR A 0.2"	2			3			5		
CBR CORR. 0.1"	2			3			5		
CBR CORR. 0.2"	2			3			5		
EXPANSION (mm)	5,84			6,48			7,11		
EXPANSION (%)	4,7			5,14			5,6		

%Densidad max	DENSIDAD	CBR(%)
95%	1387,95	2
98%	1536,64	3
100%	1647,00	5



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA: Junio 4 DE 2014
PROYECTO: Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en
LOCALIZACION: El Portugal-Via Barranca
MUESTRA: Kip
DESCRIPCION: Subrasante





UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE COMPACTACION INV-142

FECHA Junio 4 de 2014

PROYECTO Aplicación Residuo de mineria de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

LOCALIZACION El Portugal-Via Barranca

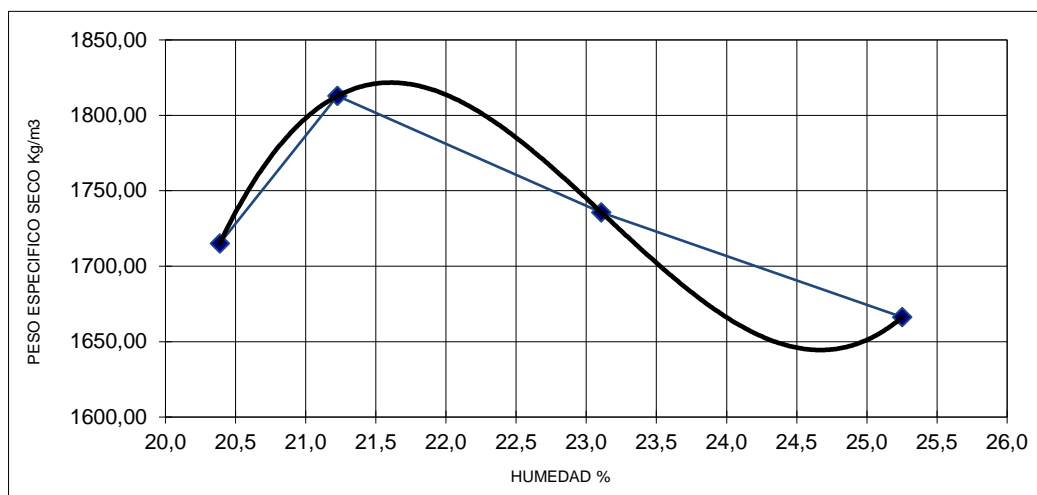
MUESTRA Kip-#4 Lutita 1+ Cemento 1

DESCRIPCION Subrasante

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
# GOLPES POR CARA	25
MOLDE No	23
DIAMETRO MOLDE(m)	0,10
ALTURA MOLDE (m)	0,12
VOL. MOLDE (m3)	0,00090

PESO TARA (Kg)	0,0068	0,0066	0,0069	0,0070	0,0076	0,0071	0,0068	0,0069
W TARA + S.H (Kg)	0,0502	0,0506	0,0508	0,0505	0,0503	0,0507	0,0501	0,0504
W TARA + S.S (Kg)	0,0428	0,0432	0,0433	0,0427	0,0425	0,0423	0,0414	0,0416
PESO AGUA	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009
PESO SOLIDO	0,036	0,037	0,036	0,036	0,035	0,035	0,035	0,035
HUMEDAD	20,6	20,2	20,6	21,8	22,3	23,9	25,1	25,4
PROM. HUMEDAD %	20,39		21,23		23,11		25,25	

PESO MOLDE (Kg)	4,285	4,285	4,285	4,285
W MOLDE+S.H (Kg)	6,150	6,270	6,215	6,170
W DEL S. H. (Kg)	1,865	1,985	1,930	1,885
DENSIDAD H. (Kg/m3)	2065	2198	2137	2087
DENSIDAD S. (Kg/m3)	1715	1813	1736	1666



DEN. MAX. Kg/m3 1820,00
HUM . OPTIMA % 21,0



**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
COMPACTACION PARA CBR**

FECHA	Junio 11 de 2014
PROYECTO	Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION	El Portugal-Via Barranca
MUESTRA	Kip-#4 Lutita 1+ Cemento 1
DESCRIPCION	Subrasante

MOLDE #	1	2	3
DIAMETRO (m)	0,150	0,150	0,150
ALTURA (m)	0,125	0,125	0,125
VOLUMEN (m3)	0,00221	0,00221	0,00221
Nº DE GOLPES	12	26	55

HUMEDAD DE COMPACTACION

PESO TARA (Kg)	0,0067	0,0069	0,0070	0,0068	0,0072	0,0069
W DE TARA + S.HUMEDO (Kg)	0,0505	0,0503	0,0502	0,0507	0,0501	0,0508
W DE TARA + S.SECO (Kg)	0,0427	0,0430	0,0430	0,0427	0,0426	0,0431
PESO DE AGUA	0,008	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008
PESO SUELO SECO	0,036	0,036	0,036	0,036	0,035	0,036
HUMEDAD EN %	21,67	20,22	20,0	22,3	21,2	21,3
PROMEDIO HUMEDAD EN %	20,9		21,1		21,2	

CONTENIDO DE HUMEDAD %	20,9	21,1	21,2
W MOLDE + S.HUMEDO (Kg)	12,7	13,2	13,5
PESO MOLDE (Kg)	8,9	9,1	9,1
W SUELO EN EL MOLDE (Kg)	3,8	4,1	4,4
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m3)	1725	1856	1987
DENSIDAD SECA (Kg/m3)	1426	1532	1639

HUMEDAD DE PENETRACION

PESO TARA (Kg)	0,0068	0,0071	0,0068	0,0069	0,0069	0,0068
W TARA + S.H. (Kg)	0,0505	0,0503	0,0508	0,0502	0,0500	0,0507
W TARA + S.SECO (Kg)	0,0382	0,0376	0,0390	0,0384	0,0387	0,0393
PESO DE AGUA	0,0123	0,0127	0,0118	0,0118	0,0113	0,0114
PESO SUELO SECO	0,0314	0,0305	0,0322	0,0315	0,0318	0,0325
HUMEDAD EN %	39,17	41,64	36,6	37,5	35,5	35,1
PROM. HUMEDAD EN %	40,4		37,1		35,3	



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA Junio 11 DE 2014

PROYECTO Aplicación Residuo de mineria de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.

LOCALIZACION El Portugal-Via Barranca

MUESTRA Kip-#4 Lutita 1+ Cemento 1

DESCRIPCION Subrasante

MOLDE No	10			11			12		
No DE GOLPES	12			26			55		
DIAS DE INMERSION	4			4			4		
PENETRACION (mm)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)	LEC	CARGA (KN)	PRESION (MPa)
0,0	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00
0,6	10	0,1	0,05	17	0,2	0,09	28	0,3	0,14
1,3	14	0,1	0,07	26	0,3	0,13	45	0,4	0,23
1,9	17	0,2	0,09	34	0,3	0,17	58	0,6	0,29
2,5	20	0,2	0,10	40	0,4	0,20	69	0,7	0,35
3,8	24	0,2	0,12	52	0,5	0,26	87	0,9	0,44
5,1	28	0,3	0,14	63	0,6	0,32	104	1,0	0,53
6,4	31	0,3	0,16	72	0,7	0,36	119	1,2	0,60
7,6	35	0,3	0,18	81	0,8	0,41	133	1,3	0,67
10,2	41	0,4	0,21	95	0,9	0,48	164	1,6	0,83
12,7	48	0,5	0,24	110	1,1	0,56	195	1,9	0,99
CBR A 0.1"	1			3			5		
CBR A 0.2"	1			3			5		
CBR CORR. 0.1"	1			3			5		
CBR CORR. 0.2"	1			3			5		
EXPANSION (mm)	4,95			5,84			6,60		
EXPANSION (%)	4,0			4,64			5,2		

%Densidad max	DENSIDAD	CBR(%)
95%	1354,70	1
98%	1501,36	3
100%	1639,00	5



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CBR INV E - 148

FECHA	Junio 11 de 2014
PROYECTO	Aplicación Residuo de minería de yeso (lutita) como estabilizador de suelos arcillosos en Santander.
LOCALIZACION	El Portugal-Via Barranca
MUESTRA	Kip-#4 Lutita 1+ Cemento 1
DESCRIPCION	Subrasante

