

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE RESIDUOS DE MINERÍA DE YESO
(MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER) EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA
DE SUELOS.**

EDGAR FERNANDO MENDOZA ENRIQUEZ

YOSEP ERLENDY MURILLO ALBERNIA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2013.**

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE RESIDUOS DE MINERÍA DE YESO
(MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER) EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA
DE SUELOS.**

AUTORES:

EDGAR FERNANDO MENDOZA ENRIQUEZ

YOSEP ERLENDY MURILLO ALBERNIA

DIRECTOR:

Dr. CARLOS ALBERTO RIOS REYES.

CO-DIRECTOR:

Msc. MARTHA PATRICIA RUIZ OJEDA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2013.**



NOTA DE PROYECTO DE GRADO

| | | |
|---|----------------------------|---------------------|
| NOMBRE DEL ESTUDIANTE YOSEP ERLENDY MURILLO ALBERNIA | | CÓDIGO 2070713 |
| TÍTULO DEL PROYECTO: EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE RESIDUOS DE MINERÍA DE YESO (MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER) EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS | | |
| REGISTRO N° | FACULTAD FISICOQUÍMICAS | CARRERA GEOLOGÍA |
| CALIFICACIÓN (letra y número) (4.0) CUATRO PUNTO CERO | | CRÉDITOS 7 |

DIRECTOR DEL PROYECTO

| | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| NOMBRE CARLOS ALBERTO RÍOS REYES | FIRMA <i>Por</i> |
|-------------------------------------|-------------------------|

CALIFICADORES

| | | |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| | | FECHA |
| GUILLERMO VARGAS PIESCHACÓN | DIONISIO ANTONIO LAVERDE CATAÑO | A M D 2013 11 12 |

Bucaramanga, martes 3 de diciembre de 2013


Señores

Universidad Industrial de Santander

E.S.D.

Por medio de la presente; yo, EDGAR FERNANDO MENDOZA ENRRÍQUEZ, estudiante de la Escuela de Geología UIS, autorizo a la Universidad Industrial de Santander para que utilice la información de mi tesis de grado titulada **EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE RESIDUOS DE MINERÍA DE YESO (MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER) EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS**, con fines educativos y para que sirva de apoyo en los estudios posteriores que se vayan a realizar

Atentamente,



EDGAR FERNANDO MENDOZA ENRRÍQUEZ

CÓDIGO 2060081

DEDICATORIA

Este logro es para mi familia, que con mucho esfuerzo me ayudaron moral y económicamente para poder formarme como profesional y persona.

A mi padre que se ha esmerado todo el tiempo para que no me falte nada y me ha enseñado a ser honorable, responsable y recto.

A mi madre que con todo el cariño que se le puede brindar a un hijo me ayudo a afrontar cada reto con alegría y dedicación.

En general a todas las personas que aportaron con algo para que me formara como profesional.

EDGAR FERNANDO MENDOZA ENRIQUEZ.

Al ser supremo que creó este mundo DIOS, quien puso en mi camino esta oportunidad de avanzar y crecer como ser humano; A mi madre *Carmen Rosa Albornia*, la mujer que más quiero, la que me dio la vida, quien siempre está a mi lado y me motiva a ser cada día de mejor, a mi Padre *José David Murillo*, el gran papá que nunca se alejó, en el siempre encuentro una voz aliento y quien me acompaña en cada etapa de mi vida, a mi hermano *Yordy* que tanto quiero, por el que voy a luchar para que tenga

siempre lo mejor, a mis abuelitas Eusebia y María Antonia, que me cargaron en sus brazos y me llenaron de amor desde pequeño, a mi abuelo Julio y a todos mis tíos. A mi compañero Mendoza y los compitas, que siempre han sido leales, y a todas aquellas personas que en algún momento de mi vida apoyaron este proyecto.

YOSEP ERLENDY MURILLO ALBERNIA

Agradecimientos

En primera estancia un agradecimiento especial a nuestros directores Carlos Alberto Ríos Reyes y Martha Patricia Ruiz Ojeda, que se comprometieron y nos orientaron para que esta investigación tuviera éxito.

Al doctor José Henao y al magister José Pinto que de manera eficaz realizaron las pruebas de difracción rayos X y a los Físicos Carlos Chacón y Carolina Mendoza que aportaron el análisis de microscopía electrónica de barrido; análisis indispensables para poder tener éxito en nuestra investigación.

A las Asistentes de la Escuela de Geología Eliana Ascanio y Sonia Sánchez que de manera atenta y amable tramitaron la documentación para que esta investigación se llevara a cabo en buenos términos.

A la geóloga Yeni Pacheco que nos otorgo gran parte de la información de la mina el diviso.

En general a nuestros amigos y compañeros de estudio Miguel Moreno, Rafael Barrera, Juan Manuel Rozo, Carlos Cote, Carlos Del Real, Laura Meléndez, Paola Santoyo, Diego Uribe, Steven Flórez, Anderson Ardila, Gerson Mendoza, Oscar Pinilla, Ferney Hernández, Diego Londoño, Leydi Castro, Diego Merchán, Laura Caicedo, María Isabel Pacheco, Flover Rodríguez, Iván Botero, Natàlia Mantilla, Leidy Plata, Leady Caro, Cesar Chacón, Leonel Porras, Fabio Viana, Juan Latorre, Carlos Delgado, Wilmer Cadena, s

Amat Zuluaga y José Rojas, sin ustedes la experiencia en la universidad no hubiese sido igual.

A los profesores Saith Kurama, Jairo Clavijo, Juan Carlos Ramírez, Jazmín Pelayo, Francisco Velandia, Ricardo Mier, Guillermo Vargas, quienes marcaron nuestra experiencia universitaria por su conocimiento y pedagogía.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCION | 20 |
| 1. OBJETIVOS | 23 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL..... | 23 |
| 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS | 23 |
| 2. MARCO TEORICO | 24 |
| 2.3 ROCAS SEDIMENTARIAS CLÁSTICAS..... | 28 |
| 2.3.1 Arenas..... | 30 |
| 2.3.2 Arcillas..... | 31 |
| 2.4 ROCAS SEDIMENTARIAS NO CLÁSTICAS..... | 33 |
| 2.4.1 Carbonatos..... | 33 |
| 2.4.2 Calizas..... | 33 |
| 2.4.3 Dolomitas..... | 34 |
| 2.4.4 Evaporitas..... | 34 |
| 2.4.5 Yeso..... | 35 |
| 2.4.6 Sal gema..... | 35 |
| 2.4.7 Fosfatos..... | 36 |
| 2.5 MINERIA DEL YESO..... | 36 |
| 2.5.1 Proceso de extracción..... | 36 |
| 2.5.2 Explotación a cielo abierto..... | 38 |
| 2.5.3 Morfología de las explotaciones..... | 38 |
| 2.5.4 Altura del banco..... | 39 |
| 2.5.5 Perforación..... | 39 |
| 2.5.6 Arranque..... | 41 |
| 2.5.7 Carga y Transporte..... | 42 |
| 2.5.9 Explotación subterránea..... | 44 |
| 2.6 Residuos de minería no metálica..... | 45 |
| 2.6.1 Residuos de la extracción..... | 45 |
| 2.6.2 Residuos del tratamiento..... | 46 |
| 2.7 Impacto ambiental generado por los residuos de minería..... | 47 |

| | |
|--|------------|
| 2.8 METODOS DE CARACTERIZACIÓN MINERAL..... | 48 |
| 2.8.1 Microscopio electrónico de barrido..... | 48 |
| 3. METODOLOGIA..... | 54 |
| 3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 54 |
| 3.2 RECOLECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES..... | 54 |
| 3.2.1 Recopilación de muestras. | 55 |
| 3.2.2 Preparación de las Muestras..... | 58 |
| 3.2.3 Secciones Delgadas. | 58 |
| 3.2.4 Caracterización Química. | 58 |
| 3.3.2 Interpretación De Los Resultados. Durante esta fase se procedió a analizar los resultados de las pruebas realizadas. | 63 |
| 3.4 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL | 63 |
| 4. RESULTADOS Y ANALISIS | 64 |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES | 64 |
| 4.1.1 Caracterización de la Lutita Compacta. | 64 |
| 5. CONCLUSIONES | 102 |
| 6. RECOMENDACIONES..... | 103 |
| BIBLIOGRAFIA | 104 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Aditivación de un suelo arcilloso con Cal (a) Aditivación de un suelo arcilloso con cemento (b)..... | 24 |
| Figura 2. Clasificación de las rocas sedimentarias según el tamaño de grano en mm..... | 29 |
| Figura 3. Usos principales de la arena en porcentaje. | 30 |
| Figura 4. Minerales arcillosos y su composición química..... | 32 |
| Figura 5. Mina de glauberita y yeso a cielo abierto en Colmenar de Oreja. | 38 |
| Figura 7. Sección de barreno antes de insertar la carga detonante..... | 42 |
| Figura 8. Sección de barreno con la carga y el cordón detonante (detalle). | 43 |
| Figura 9. Planta de transporte y triturado de roca..... | 44 |
| Figura 10. Comparación del número de electrones retrodispersados (BSE) y secundarios (SE) producidos en las mismas condiciones experimentales en función del número atómico de la muestra. | 49 |
| Figura 11. Representación en una semi-recta de los diferentes estados de un terreno (límites de atterberg)..... | 52 |
| Figura 12. Botadero de residuos de minería ubicado a un costado de la mina El Diviso..... | 55 |
| Figura 14. Apique realizado sobre la vía Curos-Málaga. | 57 |
| Figura 15. Proceso de elaboración de secciones delgadas. A) Se pule la muestra hasta obtener una superficie lisa. B) Se introduce en el horno. C) se pule la muestra para poder ponerle el vidrio. C) se pega el vidrio para seguir el proceso de pulido y llevar la sección a un valor igual o cercano de 2 micras..... | 59 |
| Figura 16. Elaboración de los cilindros de suelo para el límite plástico. | 60 |
| Figura 17. Ensayo de límite líquido en cuchara de Casagrande. | 61 |
| Figura 17. Implementos para la elaboración y descripción de una sección delgada | 63 |
| Figura 18. Foto tomada desde el microscopio de luz transmitida en nicolas cruzados. | 66 |
| Figura 18. Foto tomada desde el microscopio de luz transmitida en nicolas paralelos. | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 20. Imagen del SEM realizado a la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 1..... | 70 |
| Figura 21. Espectrograma la composición química muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 1..... | 70 |
| Figura 22. Imagen del SEM realizada a la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 2..... | 71 |
| Figura 23. Espectrograma la composición química muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 2..... | 72 |
| Figura 24. Imagen del SEM realizado a la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 3..... | 73 |
| Figura 25. Espectrograma la composición química muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 3..... | 73 |
| Figura 27. Difractograma correspondiente al suelo arcilloso (C6SP)..... | 78 |
| Figura 28. Imagen del SEM realizado al suelo arcilloso (C6SP)..... | 80 |
| Figura 29. Espectrograma de la composición química del suelo arcilloso (C6SP). 78 | |
| Figura 30. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 1. | 83 |
| Figura 31. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 1..... | 83 |
| Figura 32. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 2. | 85 |
| Figura 33. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 2..... | 85 |
| Figura 34. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 3. | 87 |
| Figura 35. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 3..... | 87 |
| Figura 36. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 4. | 89 |
| Figura 37. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 4..... | 89 |
| Figura 38. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 1. | 91 |
| Figura 39. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 1..... | 91 |
| Figura 40. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 2. | 93 |
| Figura 41. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 2..... | 93 |
| Figura 42. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 3. | 95 |
| Figura 43. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 3..... | 95 |
| Figura 44. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 4. | 97 |

Figura 45. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 4.....97

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Combinaciones utilizadas para la aditivación del suelo inestable..... | 63 |
| Tabla 2. Análisis de la sección delgada, mina El Diviso, Los Santos, Santander.. | 65 |
| Tabla 3. Condiciones para la toma de datos DRX de lutita compacta y del suelo arcilloso..... | 67 |
| Tabla 4. Resultados de DRX para la Lutita Compacta (C6SQ). | 69 |
| Tabla 5. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente de la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 1..... | 71 |
| Tabla 6. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente de la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 2..... | 72 |
| Tabla 7. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente de la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 3..... | 74 |
| Tabla 8. Datos de los diferentes pesos en gramos, necesarios para hallar el límite plástico del suelo arcilloso.. | 75 |
| Tabla 9. Límite plástico del suelo arcilloso..... | 76 |
| Tabla 10. Datos de los diferentes pesos en gramos y número de golpes necesarios para hallar el límite líquido del suelo arcilloso. | 76 |
| Tabla 11. Valores de peso en gramos, porcentajes de contenido de agua para las cuatro taras utilizadas en el límite líquido. | 77 |
| Tabla 12. Resultados de DRX para el suelo arcilloso (C6SP)..... | 76 |
| Tabla 13. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente del suelo arcilloso (C6SP). | 799 |
| Tabla 14. Aditivaciones con diferentes tipos de material y tiempo de curado. | 82 |
| Tabla 15. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 1..... | 84 |
| Tabla 16. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 2. | 846 |

| | |
|--|----|
| Tabla 17. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 3. | 88 |
| Tabla 18. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 4. | 90 |
| Tabla 19. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 1. | 92 |
| Tabla 20. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 2. | 94 |
| Tabla 21. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 3. | 96 |
| Tabla 22. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 4. | 98 |
| Tabla 23. Resultados de DRX para la aditivación ADI 1 (C7RC). | 99 |
| Tabla 24. Resultados de DRX para la aditivación ADI 4 (C7RD). | 99 |

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE RESIDUOS DE MINERÍA DE YESO (MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER) EN LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA DE SUELOS¹.

AUTORES². EDGAR FERNANDO MENDOZA ENRRIQUEZ.

YOSEP ERLENDY MURILLO ALBERNIA

Palabras claves: evaluación, estabilización, residuo, suelos, plasticidad, liquides, aditivación, minería, ambiental, curado.

DESCRIPCION

Los residuos de minería no metálica generan grandes impactos ambientales tanto físicos como biológicos tales como la inestabilidad de suelos, desestabilización de pendientes, destrucción de suelos, deforestación, contaminación de aguas, cambio en los usos del suelo etc. Sin mencionar las zonas que son utilizadas como botaderos de dichos residuos. Algunos de estos residuos contienen altos porcentajes del mineral mena, aunque no el suficiente como para ser de interés económico. La mina de Yeso El Diviso ubicada en el corregimiento el Diviso perteneciente al municipio de La Mesa de los Santos (Santander); el sector donde se explota la mina presenta dos tipos de materiales: yeso y un material estéril "la lutita". Por medio de una caracterización física y química se observó que el material estéril guardaba muchas propiedades que forman parte del yeso. En este trabajo se aplicó el material de residuo de minería en pequeñas cantidades para estabilizar un suelo arcilloso. De acuerdo a los resultados obtenidos dicho material arrojó resultados favorables, los cuales se detectaron mediante ensayos de índice de plasticidad. Para evaluar las propiedades estabilizantes de los residuos de minería del yeso en un suelo arcilloso proveniente de la vía Curos-Málaga, se generó una matriz de 8 aditivaciones: suelo 300 gramos, cemento 0,5-1% y residuo de minería 0,5-1% con un curado de 7 y 14 días. Para los dos tipos de aditivación se obtuvo resultados favorables, ya que el suelo perdió totalmente su plasticidad.

¹ Trabajo de grado.

²Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director: PhD Carlos Alberto Ríos Reyes – Codirector: Msc Martha Patricia Ruiz.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION AND APLICATION OF REIDUAL MATERIAL FROM “YESO” MINING (MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER) IN GROUND CHEMISTRY STABILITY³

AUTHORS⁴: EDGAR FERNANDO MENDOZA ENRRIQUEZ.

YOSEP ERLENDY MURILLO ALBERNIA.

Keywords: assessment, stabilization, waste, soils, plasticity, liquids, additives, mining, environmental, cured.

DESCRIPTION

No metallic mining scraps generate high environmental impacts, physical and biologic results as ground instability, slope instabilities, grounds destructions, deforestation, water pollution and change in the ground use. Some of this mining scrap has high rates of ore minerals, but not enough to be economically interesting. El Diviso gypsum mine located in “El Diviso” town, La Mesa de los Santos city (Santander), has two kinds of materials: gypsum and a sterile material, shale. Through a physical and chemical characterization had seen sterile material kept many properties that are part of the gypsum. In this paper we apply the mining scraps material in small quantities to stabilize clay soil. In accordance with the results, the material presented good results, which is detected by testing plasticity index. To assess the stabilizing properties of the mining scraps gypsum from a clay soil of Curos-Malaga pathway; thus, a matrix was generated 8 additivations: 300 g soil, cement 0.5-1% and mining scrap 0.5-1% cured with 7 to 14 days. As a result, the two types of additives favorable results were obtained, since the soil completely lost its plasticity, so it hasn't liquid limit.

³ Trabajo de grado

⁴ Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director: PhD Carlos Alberto Ríos Reyes – Codirector: Msc Martha Patricia Ruiz.

INTRODUCCIÓN

Una problemática que se encuentra asociada directamente con las irregularidades presentadas por la inestabilidad de los suelos arcillosos, afecta a nivel mundial la ejecución y duración de obras civiles como vías, puentes y edificaciones que contribuyen al desarrollo y crecimiento de un país. Muchas de estas obras son construidas sobre áreas que no cumplen con las condiciones necesarias debido a la falta de terrenos adecuados⁵.

La presencia de arcillas expansivas provoca graves problemas de estabilidad en regiones con clima árido. En estas áreas, la arcilla es tan seca que tan sólo con recibir una pequeña cantidad de agua puede liberar una potente energía capaz de producir daños importantes en obras⁶.

La hinchazón y contracción de un suelo expansivo causa un daño significativo a obras civiles mencionadas anteriormente. Este daño se puede atribuir a las fluctuaciones de la humedad causadas por variaciones estacionales. Una gran mayoría de los suelos expansivos se constituyen de arcillas ricas en Montmorillonita, arcillas sobreconsolidadas y lutitas⁷.

Nuestro país, Colombia; presenta grandes variaciones climáticas que se atribuyen a su ubicación en la zona intertropical, por ejemplo las de humedad en las temporadas de invierno, las cuales inciden notablemente en el comportamiento de las arcillas que componen los suelos, generando cambios paulatinos que con el tiempo producen alteraciones que tienden a ser negativas para los materiales que constituyen el suelo.

Cuando los arcillosos interactúan con los líquidos, sufren una expansión en su estructura, este fenómeno da lugar a un cambio de su volumen, dicho suceso

⁵Yilmaz I et. al., 2001

⁶Gueddouda M.K et. al., 2001

⁷Nelson y Miller., 1992

genera movimientos en el terreno que ponen en riesgo la estabilidad de una estructura⁸.

La repetición de los movimientos generados en el subsuelo por los cambios que sufren las arcillas, causan un gran daño a los sistemas de cimentación y elementos estructurales. En un número significativo de casos, la estructura se vuelve inhabitable. Incluso cuando se realizan pruebas para en buscando reducir la capacidad de expansión del suelo, la falta de tecnología adecuada, da como resultado cambios volumétricos que son responsables de miles de millones de dólares en daños cada año⁹.

Los métodos que se utilizan para mejorar la calidad del suelo generalmente son costosos; pero a largo plazo pueden llegar a generar rentabilidad, pues los cambios positivos que se puedan obtener minimizarían los costos de una posible reparación de los daños causados por la inestabilidad.

Existen métodos para el tratamiento de suelos ricos en sulfatos, y suelos expansivos; pero su implementación no ha logrado proporcionar soluciones efectivas y precisas. “Durante las últimas tres décadas, una extensa investigación ha llevado a cabo para mejorar los métodos de tratamiento, que ahora se pueden clasificar en cuatro categorías principales, sobre la base de los mecanismos de procesamiento del suelo: la estabilización mecánica, estabilización química, la estabilización térmica y estabilización eléctrica”¹⁰ Se han implementado técnicas y estudios previos donde por medio de la adición de sustancias a los suelos arcillosos se busca lograr mejorar el comportamiento del suelo, un caso como el del trabajo presentado en artículo de M.K. Gueddouda et. Al, una contribución a la aplicación de técnicas de estabilización química, mediante la adición de sal (NaCl) para diferentes concentraciones de cal, cemento, asociación cal + cemento, la asociación de cal y sal de tres arcillas diferentes, dos arcillas pertenecientes a

⁸Bell et. al., 1995

⁹M. Malhotra et. al., 2013

¹⁰ G. Shantaram et. al., 2005

diferentes regiones áridas del sur de Argelia y una arcilla muy expansiva conocida como bentonita Maghnia (en la región de Tlemcen). Los resultados que mostraron estas adiciones de sustancias y combinaciones de las mismas dieron lugar a cambios satisfactorios en el comportamiento de las arcillas, disminuyendo su capacidad de hinchamiento.

Con la intención de buscar alternativas económicas y eficaces que contribuyan a corregir los problemas de inestabilidad, enfocamos este proyecto de investigación hacia la estabilización de suelos arcillosos, aplicando residuos de minería de yeso a un suelo específico para intentar mejorar sus propiedades. La obtención de buenos resultados en este proyecto, a lo que le apuntamos, mostrará que con la implementación estos residuos de minería se logra mejorar las propiedades del suelo, y que además de utilizarse como agentes estabilizadores, contribuyen directamente a disminuir la contaminación por la actividad minera siendo reciclados y empleados como solución a un problema que afecta la infraestructura mundial.

1. OBJETIVOS.

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la aplicación de residuos de minería del yeso en la estabilización química de suelos arcillosos

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Evaluar mediante una caracterización físico-mecánica y química el comportamiento de estos suelos antes y después de la estabilización.
- Describir petrográficamente las muestras con el fin de conocer su distribución mineral y textural.
- Determinar una relación óptima de suelo inestable y residuos con el fin de mejorar las propiedades físico-químicas de un suelo arcilloso.
- Comparar el comportamiento del suelo antes y después de la aditivación con residuo de minería del yeso y cemento.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 ANTECEDENTES.

Cuando los suelos en un sitio son inestables o tienen índices de consistencia inadecuados tales como, permeabilidad alta, o cualquier otra propiedad indeseable que hace inadecuado el suelo para un proyecto de construcción, se deben realizar trabajos para mejorar las propiedades físicas y químicas de dicho suelo. Hay varios métodos de estabilización física y química, en la estabilización química se utiliza especialmente la cal (figura 1a), este método es comúnmente aplicado entre los demás debido a su uso eficaz y económico.

Figura 1. Aditivación de un suelo arcilloso con Cal (a) aditivación de un suelo arcilloso con cemento (b).



Fuente: (a) Moreno P, 2004, Excavaciones Gasso S.L, 2012.

Se encontró que la adición de la cal necesaria para la estabilización de los suelos es entre 1 % y 3 %, mientras que otros investigadores sugirieron el uso de cal entre 2 % y 8 % de cal en peso, en la mayoría de los casos, el efecto de la cal en

la plasticidad de los suelos arcillosos es más o menos instantáneo. En otras palabras, la plasticidad se reduce.¹¹

El otro agente estabilizador de suelo expansivo es el cemento que se compone de óxidos de calcio, sílice, alúmina, y el hierro. La estabilización con cemento también es similar a la estabilización con cal y produce similares resultados. La adición de cemento (figura 1 b) reduce el potencial de hinchamiento, índice de plasticidad y límite líquido. Vínculos entre el silicato de calcio y aluminato productos de la hidratación y las partículas del suelo. La permeabilidad de las arenas y gravas se reduce en gran medida mediante la adición de cemento mientras que limos, arcillas y arcillas limosas, pesados muestran aumento de la permeabilidad. El objetivo de otros materiales es proporcionar mezcla de cementación artificial, por lo tanto aumento de la fuerza y la reducción tanto de la compresibilidad y conductividad hidráulica. También reduce el potencial de expansión en arcillas; Las mezclas de suelo-cemento se pueden hacer con casi cualquier tipo de suelo. El resultado es equivalente a un hormigón de bajo grado, y mucho menos caro. El contenido de cemento generalmente varía entre el 8 y el 12 por ciento del volumen. Un suelo areno arcilloso se utiliza por lo general después de haber sido mezclado con un poco cemento o cal y luego de un determinado curado se obtiene un suelo con mayor resistencia a la compresión y resistencia a la tracción, mejor cohesión y una mejor resistencia al agua es decir su estabilidad natural aumente.

La literatura contiene un gran número de técnicas para la estabilización de suelos. Sin embargo, el uso de yeso como un agente estabilizante, actualmente no está claro. Este documento trata de la realización del yeso como un aditivo para el tratamiento de los suelos inestables. Diferentes cantidades de yeso, tales como 2,5%, 5%, 7,5%, y 10% en masa se añadieron a suelos inestables seguido de esto

¹¹S. Eren et. al., 2009

fueron compactados con agua¹². Límites de Atterberg, hinchamiento libre y las pruebas de resistencia a la compresión no confinada se realizaron en muestras tratadas y no tratadas, después de un período de curado de 7 días. Cambios obtenidos en la plasticidad y parámetros de las muestras tratadas y no tratadas indican que el yeso puede ser utilizado como un agente para la estabilización de suelos arcillosos expansivos, de manera efectiva.

“Sin embargo, es muy difícil encontrar en la literatura información significativa de yeso como un agente estabilizante”.¹³ Investigadores de la economía de la utilización de mezclas de cal-yeso, registraron los cambios de presión de hinchamiento. Se encontró un aumento de la fuerza de las muestras de suelo fosfatados mezclados con yeso después de un período de curado de 360 días. Se mencionó “el efecto de la estabilización de yeso en suelos (erosionable) sobre todo en la construcción de una presa sobre las paredes de dicha obra, e informó que el yeso en forma de polvo muy finamente dividido puede haberse utilizado como un material de estabilización debido a su costo relativamente razonable y a la solubilidad en agua”¹⁴. La tasa de reacción de intercambio de base está controlada por su solubilidad en agua, con un alto valor de pH. Este trabajo presenta los resultados del tratamiento de las arcillas expansivas con yeso por medio del potencial de hinchamiento y fuerza. En este estudio, diferentes cantidades de yeso (2,5%, 5%, 7,5%, y 10% en masa) se mezclaron con bentonita y se compactaron con un contenido de agua óptimo determinado por ensayos de compactación estándar en la bentonita utilizada.

¹² Işık Yılmaz et. al., 2009

¹³ Ameta et. al., 2007

¹⁴ Bell et. al., 1994

2.2 ROCAS SEDIMENTARIAS.

Las rocas sedimentarias son el resultado del material que se genera como consecuencia de la descomposición química y de la desintegración mecánica que sufren las rocas preexistentes y depositadas en forma de capa subparalela en la superficie de la litósfera. Aunque muchas rocas sedimentarias se hayan formado a partir de sedimentos más antiguos, inevitablemente todas deben haber provenido originalmente de rocas ígneas. F.W. Clarke, estima que existen 370 millones de kilómetros cúbicos de rocas sedimentarias, lo cual representa menos de 5 por ciento del volumen de la corteza terrestre.

En general, las rocas sedimentarias se producen de dos modos diferentes: (1) algunas son acumulaciones mecánicas transportadas ya sea por el hielo, agua o el aire de partículas de rocas y son conocidas como clásticas o detríticas; y (2) otras son depositadas por medios químicos (incluyendo bioquímicos) y se designan no clásticas. La mayoría de los sedimentos depositados mecánicamente consisten en detritos o partículas provenientes de la Tierra, representados por los materiales de la meteorización y la erosión de rocas preexistentes. Los sedimentos depositados por medios químicos constan principalmente de sustancias como carbonatos, sílice y cloruros que en los cristales individuales se mantienen comunicados por uniones químicas o están entrelazados uno dentro de otro. Casi todas las rocas no clásticas se originan por precipitación de extensiones de aguas superficiales. La precipitación puede ser causada por evaporación, por reacciones inorgánicas entre sales disueltas o por organismos como bacteria, corales o moluscos.

Las rocas químicas pueden ser depositadas sin incorporación alguna de detritos derivados de la tierra; sin embargo, es común que contengan fragmentos clásticos. Existe una graduación entre los sedimentos detríticos y las rocas químicas (no clásticas), cada una de las cuales es un miembro completo de una serie de rocas sedimentarias. La mayoría de las rocas sedimentarias son mezclas

de componentes de rocas clásticas y no clásticas. Por ejemplo, la mayoría de las areniscas contienen arcilla y material calcáreo, la mayoría de las calizas y dolomitas contienen fracciones arcillosas, y la mayoría de las pizarras contienen carbonato, arena y limo. Esto usualmente se expresa usando un adjetivo clarificativo como arena arcillosa o calcárea, caliza arenosa o arcillosa y así sucesivamente¹⁵.

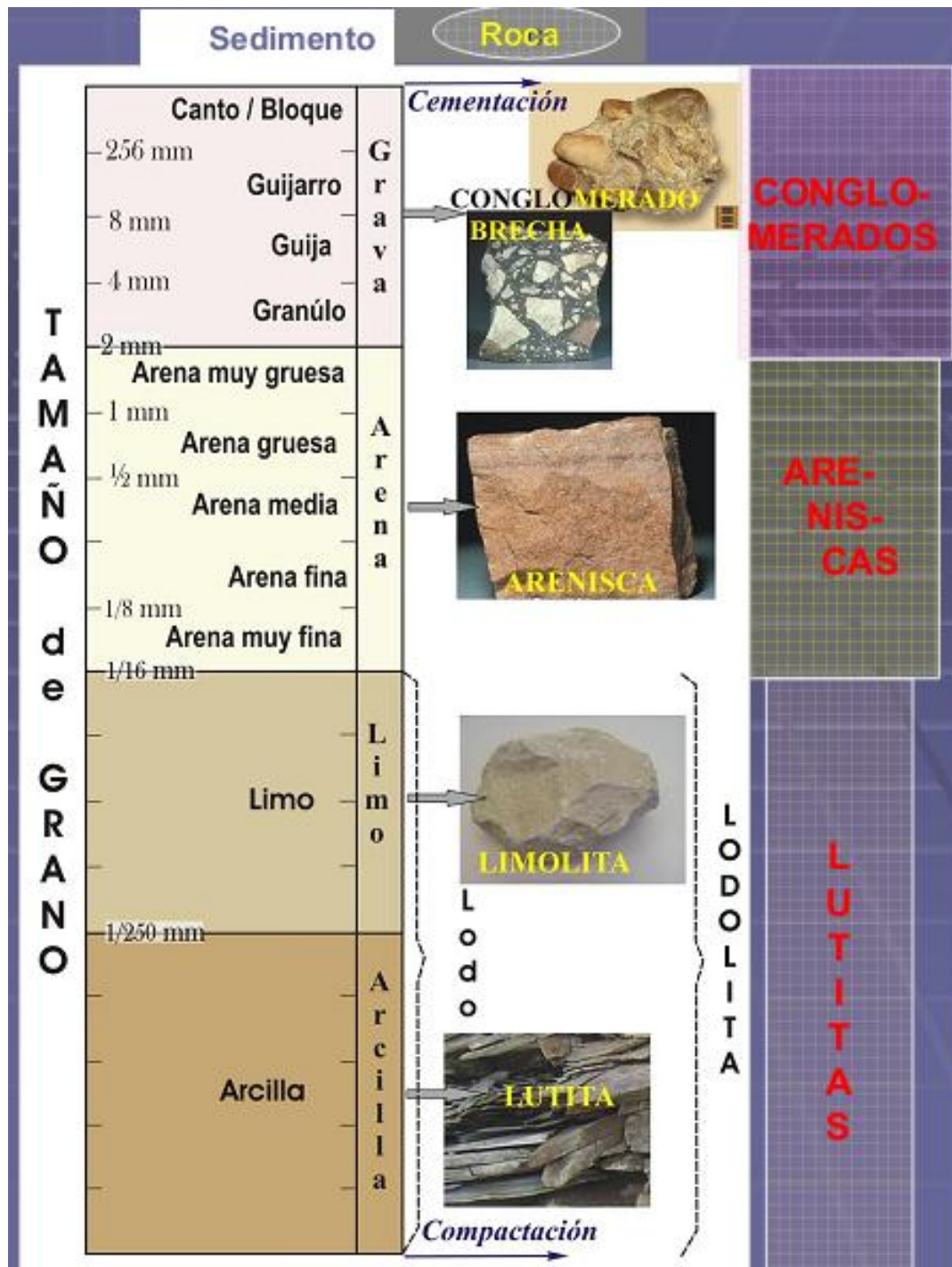
2.3 ROCAS SEDIMENTARIAS CLÁSTICAS.

Las rocas clásticas o detríticas se clasifican según el tamaño de grano de los fragmentos que las componen. Se ha establecido un límite que los define (2 mm de diámetro), por debajo del cual los componentes se denominan arena y por encima grava. Cuando las arenas están cementadas se denominan arenitas. Cuando las gravas están cementadas se denominan conglomerados (figura 2). Cuando las arenas o arenitas son de tamaño muy fino (diámetro inferior a 0,06 mm) se pasa a limos y arcillas también llamadas lutitas caracterizados por su composición mineralógica especial (mineral de arcilla) resultante de la alteración de los feldespatos.

Cuando los productos de la erosión dejan de estar en suspensión en los medios de transporte (agua, hielo o aire) se depositan por la acción de la gravedad. Estos depósitos superficiales son llamados sedimentos clásticos. En la superficie de la Tierra existen zonas más apropiadas que otras para que se realice el proceso de sedimentación. Las primeras serían las zonas más elevadas, donde los agentes erosivos y de transporte desplazan rápidamente los residuos de la destrucción mineralógica. Las segundas serían las zonas deprimidas, donde los agentes transportadores pierden su energía y permiten la deposición de la carga que arrastran. Dentro de las rocas sedimentarias clásticas encontramos:

¹⁵Lopez V., 2003

Figura 2. Clasificación de las rocas sedimentarias según el tamaño de grano en mm.



Fuente: usuarios.geofisica.unam.mx, 2012.

2.3.1 Arenas. Es una denominación que se refiere técnicamente a las partículas de cuarzo mayormente y pocas impurezas de feldespato, mica y óxidos de hierro. Existen también arenas oscuras casi negras (magnetita y titanífera), arenas coralinas, arenas selenitas y otras. El tamaño de las partículas de arena oscilan entre 0,06 y 2 mm de diámetro, la arena gruesa oscila entre 0,6 y 2 mm y la arena fina entre 0,06 y mm. La grava está formada principalmente por guijarros y granos de cuarzo, aunque también comprende guijarros de otras rocas y minerales. Tanto la arena como la grava son de orígenes detríticos. La grava oscila entre 2 y 8 mm.

Figura 3. Usos principales de la arena en porcentaje.

| Uso | Porcentaje (%) |
|--------------------|----------------|
| Construcción | 50 |
| Pavimentación | 30 |
| Balasto | 1 |
| Vidrio | 5 |
| Arena para motores | 3 |
| Abrasivos | 1 |
| Modelado | 7 |
| Otros | 3 |
| Total | 100 |

Fuente: López V 2003.

Este tipo de sedimento presenta muchos usos en la industria de la construcción y obras civiles entre otros (figura 3). La arena y la grava se presentan en capas sedimentarias, en lentes y bolsas, en la superficie cercana e interestratificadas con otras capas sedimentarias. Se encuentran formando depósitos Fluviales o de llanuras de inundación, depósitos de playa, depósitos por el viento, dunas de

arena del desierto y en capas sedimentarias marinas o de agua dulce. Los sedimentos de arenas, gravas y arcillas ocurren principalmente en los siguientes medios ambientales de deposición: fluvial, litoral, eólico y glacial.

2.3.2 Arcillas. Son aquellas sustancias terrosas formadas principalmente por silicatos alumínicos con materia coloidal y partículas de fragmentos de rocas, que generalmente se hacen plásticas cuando están húmedas y duras por la acción del fuego. Estas propiedades dan a las arcillas su utilidad, puesto que se les puede moldear en casi todas las formas, las cuales conservan después de ser sometidas a la acción del fuego. La arcilla tiene muchos otros usos además de la cerámica, principalmente en la construcción (tejas, ladrillos, tubos, baldosas), fabricación de papel, fabricación de insumos químicos etc. La arcilla no es un mineral sino una roca sedimentaria que se ha formado mediante la desintegración química de las rocas alumínicas. Está compuesta principalmente por sílice, alúmina y agua; conteniendo también otras sustancias como fragmentos de rocas, de óxidos hidratados de hierro, álcalis y materiales coloidales (véase figura 4). En esencia los minerales de la arcilla son silicatos de aluminio. En algunas arcillas los elementos alcalinos se presentan como constituyentes; en otras el magnesio, el hierro o ambos elementos sustituyen total o parcialmente al aluminio. La mayoría de las arcillas se han formado por la desintegración de rocas con un alto contenido de alúmina, a pesar de que algunas son producto del metamorfismo. Estas últimas aparecen sólo en pequeñas cantidades.

Los constituyentes químicos esenciales de los minerales de la arcilla varían no sólo en cantidad sino también en el modo en que se combina o se presentan en los diferentes minerales. Los minerales arcillosos más importantes se encuentran en el grupo de las caolinitas y de las montmorillonitas. Las arcillas esenciales de los sedimentos arcillosos son el resultado de la meteorización de rocas ígneas y metamórficas. En condiciones de escasa precipitación, el magnesio de las rocas ígneas máficas permanece en la zona de meteorización y la arcilla producida es

montmorillonitas. Si la precipitación es considerable, se efectúa una lixiviación completa de la roca, el magnesio es separado y el producto de la meteorización es caolinita. A partir de una roca ígnea ácida se origina illita y montmorillonitas en condición de meteorización, con tal que ocurra retención de potasio y magnesio, pero se formaría caolinita de prevalecer una lixiviación excesiva. A continuación presentamos una lista de los minerales arcillosos y sus composiciones.

Figura 4. Minerales arcillosos y su composición química.

| Mineral | Composición |
|----------------|--|
| Caolinita | $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ |
| Montmorilonita | $\text{Si}_{24}\text{O}_{80}\text{Mg}_2(\text{OH})_{12}(\text{Na}_2\text{Ca})$ |
| 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. 2003.

Las propiedades físicas más importantes de las arcillas son: plasticidad, que permite que sea moldeable; resistencia a presión, tensión o cizallamiento; retracción tanto en el secado como mientras está en el horno; temperatura de cocción y vitrificación; y color de calcinación, que se debe principalmente a los óxidos de hierro presentes. La composición y su naturaleza determinan el uso y el valor de la arcilla. El cuarzo disminuye la plasticidad y la retracción, y contribuye a hacerla refractaria. La sílice en forma coloidal aumenta la plasticidad. La alúmina la hace refractaria. El óxido de hierro, al igual que el feldespato, disminuye la temperatura de fusión, actúa como fundente y también es un poderoso agente

colorante. Un poco de óxido de hierro colorea intensamente la arcilla tostada, pero una gran cantidad la convierte en un producto rojo o blanco si tiene 5% menos.

2.4 ROCAS SEDIMENTARIAS NO CLÁSTICAS.

La mayoría de las rocas sedimentarias no clásticas o depositadas bioquímicamente son monominerálicas. Entre las rocas no clásticas las de carbonatos son, con ventaja, las más abundantes. La caliza y la dolomita son las más importantes de las rocas sedimentarias de carbonatos. Las calizas y dolomitas son producidas por uno o más de varios modos de deposición, a saber: mecánica, química orgánica o por reemplazamiento. Las evaporitas son rocas sedimentarias formadas por precipitación de sales procedentes de cuerpos de disoluciones concentradas rodeadas de tierra. Las rocas sedimentarias silíceas se forman a profundidad y en ambiente físico-químico durante la deposición. El origen de los sedimentos fosfáticos no ha sido totalmente comprendido; pero la acumulación podría tener lugar en condiciones de sedimentación en áreas restringidas en las cuales prevalezcan circunstancias reductoras. Por ejemplo, cuando el agua de mar está saturada con una solución diluida de fosfato tricálcico¹⁶

2.4.1 Carbonatos. Las rocas de carbonatos están compuestas esencialmente por minerales de carbonatos. El carbonato de calcio, principalmente en forma de calcita, y el carbonato cálcico magnesio, en forma de dolomita, son los constituyentes principales de las rocas sedimentarias carbonatadas, respectivamente calizas y dolomitas.

2.4.2 Calizas. Pueden ser de agua dulce o de origen marino, y componerse de material químicamente precipitado, orgánico o detrítico. La mayoría de las calizas

¹⁶López V., 2003

se formaron en aguas poco profundas y las condiciones de turbulencia o de ambiente tranquilo se reflejan en la existencia del soporte de grano con relleno de calcita cementante en el primer caso, o la existencia de espacios porosos rellenos con lodo carbonatado, en el segundo. Las calizas son la materia prima de la cal y el cemento, complementando el proceso con arcillas ferruginosas. Las calizas fosfóricas son útiles como materia prima para fertilizantes. Hay calizas útiles en litografía (detrítica de ambiente marino) y para productos refractarios (organógena marina)¹⁷.

2.4.3 Dolomitas. La roca tiene una mezcla de carbonato cálcico y magnésico y puede tener dos orígenes. El primero aparece dentro de la cuenca de deposición, sólo a unos cuantos decímetros por debajo de la superficie e inmediatamente después de la deposición de la caliza, en un proceso asociado a la formación de las evaporitas, y el segundo tiene lugar a más profundidad y mucho tiempo después de la deposición (aquí se produce una dolomita de grano grueso y la sustitución está causada por soluciones ricas en magnesio que se filtran a través de la caliza)¹⁸.

2.4.4 Evaporitas. Son rocas sedimentarias producidas en clima cálido y árido, por la evaporación del agua del mar. Experimentalmente al evaporarse el agua marina se origina la formación de carbonato cálcico, después sulfato cálcico (yeso) y finalmente las sales más solubles, incluida la halita (sal común). Sin embargo, cuantitativamente las evaporitas no pueden deberse a una simple evaporación puesto que una capa de metro y medio de halita requiere la desecación de 100 metros de profundidad marina y hay muchos depósitos de sal con cientos de metros de espesor en mares abiertos. El resultado de tales procesos, si se dan

¹⁷Duque G., 2003

¹⁸Duque G., 2003

sedimentos porosos, es que la caliza original se sustituye por dolomita de grano fino y el sulfato cálcico (anhidrita) crece dentro del sedimento y lo deforma¹⁹.

2.4.5 Yeso. Es un sulfato hidratado con 20 por ciento de agua. Se da en forma de bancos, lentejones y cavidades intercaladas en arcillas calcáreas y sales en varias series evaporíticas. El yeso ocurre en las variedades siguientes: yesos en roca, gipsita, forma impura, alabastro, variedad traslúcida de gran fino y selenita, forma cristalina. El yeso generalmente se presenta en capas lisas o suavemente inclinadas. Se extrae mayormente mediante procedimientos subterráneos. Se emplea para retardar el cemento Portland y para fines agrícolas. Su propiedad más importante consiste en que después de calcinado, se le añade agua y se convierte en yeso de París y otros yesos de fraguado rápido. Aproximadamente 90 por ciento del yeso producido se emplea en la construcción en forma de mortero, cementos y enlucidos²⁰.

2.4.6 Sal gema. Cloruro sódico (halita). La sal, frecuentemente de notable pureza, ocurre en mantos transparentes. La sal se denomina generalmente salmuera o sal gema. Las capas de sal se originan por la evaporación de las aguas salinas en forma de depósitos sedimentarios de tipo químico en los mares cerrados y bajo climas cálidos. Los depósitos de sal gema se encuentran generalmente en capas interestratificadas con estratos arcillosos. La sal comercial procede de fuentes distintas: depósitos estratificados sedimentarios, salmueras, agua de mar, depósitos superficiales de playa y domo de sal. Usos: La sal gema es indispensable en la alimentación humana y animal, importantísima en la industria

¹⁹ Duque G., 2003

²⁰López V., 2003

Química y también se utiliza en aparatos científicos. Su explotación da como subproductos potasio, magnesio, cloro, bromo, yodo, etc.²¹.

2.4.7 Fosfatos. Proviene de rocas ígneas. La meteorización de estas rocas disuelve el fosfato contenido en ellas y la solución es arrastrada al mar, donde es depositada en capas conjuntamente con substancias carbonadas, formándose los depósitos de fosfato. Las rocas fosfáticas se presentan en tres formas diferentes: capas fosfáticas sedimentarias marinas, son deposiciones químicas marinas en grande cuencas cerradas; margas y caliza, son simplemente capas sedimentarias con un elevado contenido de fosfatos; y capas calcáreas remplazadas por fosfatos. Desde hace un siglo aproximadamente, se descubrió que el fosfato de cal es un material beneficioso para la tierra de cultivo y desde entonces ha aumentado el empleo de los fosfatos calcáreos como fertilizantes. El tratamiento con ácido sulfúrico da fosfatos ácidos, conocidos con los nombres de súper-fosfato y fosfato de bicalcio, en cuyas formas el fósforo es fácilmente aprovechable como alimento para los vegetales. El fosfato se usa también en la industria siderúrgica, para revestimiento contra la herrumbre, en la industria de exterminio de insectos y en la industria de armas bélicas²².

2.5 MINERÍA DEL YESO.

2.5.1 Proceso de extracción. La explotación debe tener un mínimo de sulfato cálcico para la fabricación del producto final deseado, que suele variar entre un 80-85%, cuando el material que se desea obtener es yeso común; cuando se requiere para escayolas especiales, el porcentaje de sulfato debe estar

²¹López V., 2003

²²López V., 2003

comprendido entre un 92-95% de riqueza. Algunas impurezas como margas pueden ser interesantes en pequeñas cantidades para ciertos productos, pero las sales solubles como los cloruros, el sulfato de magnesio o el sulfato de sodio y yesos con intercalaciones de carbonatos que alteran el proceso, los moldes cerámicos o los prefabricados, deben evitarse. El tonelaje que se extraiga del yacimiento debe ser suficiente para justificar las inversiones en la cantera y en la fábrica donde se producirán materiales a base de mineral de yeso. La capacidad de producción y las reservas de mineral deben equilibrarse; éstas deben ser suficientes para abastecer a la fábrica durante el periodo mínimo calculado en función de su vida prevista. La estructura geológica del yacimiento es un factor muy importante, ya que determina las reservas explotables. Si la cobertura de mineral estéril es pequeña, el yacimiento se puede explotar a cielo abierto, lo cual incide en el abaratamiento de los costos de producción y de los índices de recuperación del yacimiento. Si el yacimiento tiene una pendiente muy fuerte y el espesor de la cobertura aumenta rápidamente, el desmonterado de los materiales estériles es económicamente oneroso. En algunos lugares de Europa, dado que el espesor de cobertura es importante, se explotan canteras subterráneas, lo cual encarece enormemente el producto, siendo de 1/3 los costos de ese tipo de explotaciones. La presencia de fallas origina grandes problemas en las canteras porque un frente de avance puede quedar bruscamente interrumpido, originando problemas de producción, seguridad y homogeneidad en la calidad. Una zona donde estén localizadas numerosas fallas no es interesante económicamente. La presencia de agua es un peligro y un perjuicio para toda la cantera. Durante los trabajos de reconocimiento, hay que tomar medidas para asegurarse de que los niveles de agua no llegarán a inundar la cantera. Deben dejarse suficientes capas contra las capas acuíferas importantes. Tendrán que considerarse también las posibles llegadas de agua a lo largo de los planos de falla. Debe evitarse la explotación de una cantera siguiendo el buzamiento de las capas donde puedan sobrevenir importantes avenidas de agua²³.

²³Cerulla J., 1997

2.5.2 Explotación a cielo abierto. Es una excavación realizada en la superficie del terreno con objeto de extraer un material o mineral beneficiable. Esta operación implica, generalmente mover cantidades variables de estéril según la profundidad del depósito o del espesor de recubrimiento. La explotación quedará definida por la aplicación de unos parámetros de diseño en la excavación para que permitan alcanzar las producciones programadas de la forma más económica posible, en las mejores condiciones de seguridad²⁴.

2.5.3 Morfología de las explotaciones. La explotabilidad económica de los yacimientos de yeso, depende del tamaño de las masas yesíferas. En casi todos los casos los yacimientos explotados son capas o paquetes de capas de gran potencia con recubrimientos de mayor o menor espesor o incluso aflorantes.

Figura 5. Mina de glauberita y yeso a cielo abierto en Colmenar de Oreja.



Fuente: espormadrid.es, 2010.

Es habitual que la topografía del terreno donde se sitúan las explotaciones sea subhorizontal (véase figura 5), como las capas de mineral, explotándose toda la corrida de la capa en un único o varios bancos, dependiendo de la potencia de la capa. Existe alguna explotación, en la que se explota una gran masa de mineral

²⁴CerullaJ., 1997

situada en una topografía accidentada mediante bancos a media ladera, explotándose sólo la zona económica del yacimiento²⁵.

2.5.4 Altura del banco. Se establece a partir de las dimensiones de los equipos de excavación y carga, las características del macizo y la exigencia de la selectividad. La experiencia de las explotaciones a cielo abierto más tecnificadas sugiere alturas de entre 10 y 20 metros. La altura reducida nos permite en el yeso unas menores cargas operantes de explosivo, disminuyendo los problemas ocasionados por las vibraciones y la onda aérea, con unas correctas secuencias de encendido, así como un mayor control en la producción de finos²⁶.

2.5.5 Perforación. Habitualmente el diámetro de la perforación empleado se encuentra entre los 64 y 105 mm, utilizando perforadoras neumáticas o hidráulicas equipadas con martillo en fondo o en cabeza. La cuadrícula de perforación, depende directamente del diámetro de perforación, y de la dureza particular del mineral. Una práctica habitual en las explotaciones de yeso es el diseño de las voladuras de una sola fila de barrenos a lo largo de un banco de mayor o menor longitud, debido a la gran importancia que tiene el tamaño del mineral volado respecto a su posterior tratamiento (véase figura 6).

En casi todos los casos los hornos de fabricación necesitan unos tamaños mínimos de admisión, con lo que la producción en la voladura de tamaños menores a ese mínimo suponen la pérdida de reservas de mineral aprovechable, la creación de escombreras de estériles, a veces de pureza superior al 95%, y un encarecimiento del material aprovechable que no es aconsejable.

²⁵ Cerulla J., 1997

²⁶ Guillen J., 2005

En ciertas explotaciones no se realizan voladuras de una sola fila, sino de varias filas, obteniendo buenos resultados de fragmentación. Esto se debe principalmente al tipo de mineralización. Por ejemplo, en una mineralización como la de la cantera de Iberyeso en Gelsa (Zaragoza), consistente en una serie de capas formadas por bloques de yeso muy puro, de forma más bien redondeada, envueltos en una matriz térrea, la producción de finos es prácticamente independiente del número de filas de la voladura, debido fundamentalmente a que la matriz de tierra de las capas impide que los bolos se troceen²⁷.

Figura 6. Fragmentación de una voladura convencional (Mina Toquepala)



Fuente: Copper S, 1998.

En casi todos los casos los hornos de fabricación necesitan unos tamaños mínimos de admisión, con lo que la producción en la voladura de tamaños menores a ese mínimo suponen la pérdida de reservas de mineral aprovechable,

²⁷ Guillen J., 2005

la creación de escombreras de estériles, a veces de pureza superior al 95%, y un encarecimiento del material aprovechable que no es aconsejable.

En ciertas explotaciones no se realizan voladuras de una sola fila, sino de varias filas, obteniendo buenos resultados de fragmentación. Esto se debe principalmente al tipo de mineralización. Por ejemplo, en una mineralización como la de la cantera de Iberyeso en Gelsa (Zaragoza), consistente en una serie de capas formadas por bloques de yeso muy puro, de forma más bien redondeada, envueltos en una matriz térrea, la producción de finos es prácticamente independiente del número de filas de la voladura, debido fundamentalmente a que la matriz de tierra de las capas impide que los bolos se trocean²⁸.

2.5.6 Arranque. El yeso, sin ser un material duro, presenta unas capacidades de resistencia, compacidad, plasticidad, etc. que le hacen difícilmente ripable, al menos con rendimientos comparables a los obtenidos con las voladuras. En la mayor parte de las explotaciones de yeso se emplean explosivos para el arranque. Básicamente, el método consiste en la perforación de una serie de barrenos de diámetro variable formando una cuadrícula, que se cargan con explosivo de distintos tipos y se inician con cordón detonante y detonadores (véanse figuras 7-8). En el fondo de los barrenos se carga una pequeña cantidad (2,5 kg) de un explosivo potente y rompedor, bien Goma 2 EC o Riogel 2, que favorece el arranque en el pie del banco (la zona de mayores dificultades); este explosivo está encartuchado. El resto del barreno se llena con un explosivo de potencia media y una alta producción de gas llamado Nagolita, que se carga a granel en sacos o con un vehículo cargador; este explosivo efectúa el arranque y la fragmentación del material, así como el desplazamiento del mismo. Entre ambos explosivos se consigue un efecto doble de arranque y rotura²⁹.

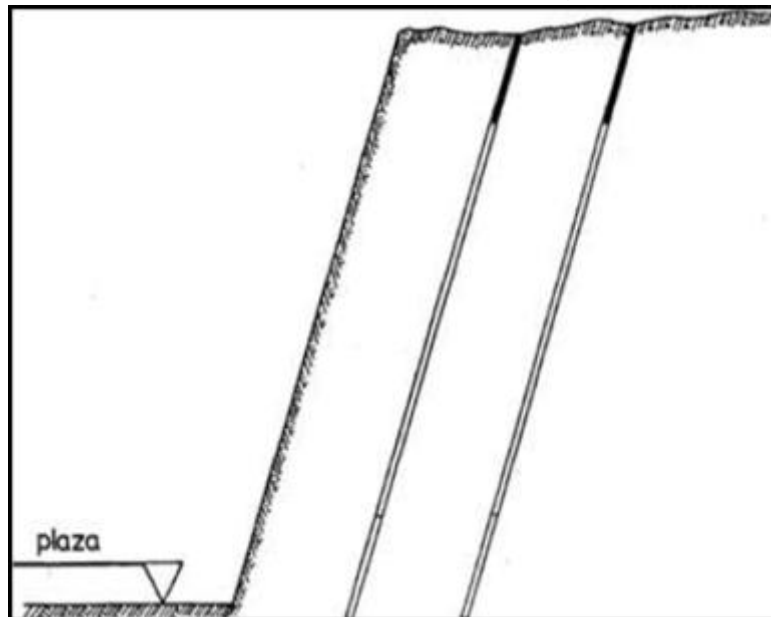
²⁸ Guillen J., 2005

²⁹ Cerulla J., 1997

La cantidad de explosivo en relación a la cantidad de material arrancado se denomina consumo específico y varía en función de diversos aspectos de la voladura (tipo de material, geometría de la voladura, fragmentación y resultados deseados) y suele ser de unos 300 g/m³.

2.5.7 Carga y Transporte. La carga del mineral en las explotaciones a cielo abierto se realiza mediante palas cargadoras de ruedas y también mediante retroexcavadoras. Estas palas cargan el mineral sobre distintos tipos de vehículos, que pueden ser Dumpers o camiones volquete.

Figura 7. Sección de barreno antes de insertar la carga detonante.

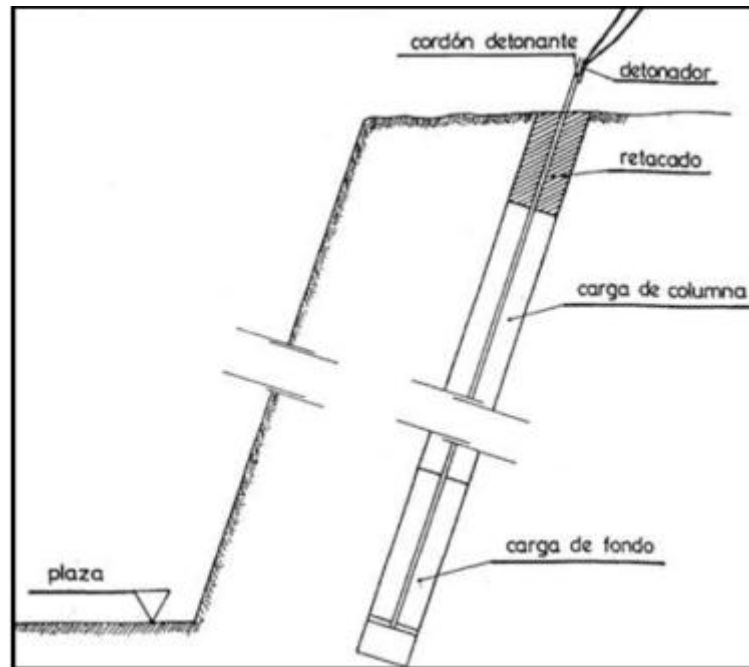


Fuente: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 36, 1997.

La carga debe estar dimensionada según el tamaño de los bloques, el medio de transporte hasta la planta de tratamiento y sobre todo de la capacidad de producción de las plantas de machaqueo y clasificación, que nos dan la

producción máxima a obtener, que puede encontrarse en la misma cantera, en la planta de fabricación, o bien situadas a distancias variables de las canteras³⁰.

Figura 8. Sección de barreno con la carga y el cordón detonante (detalle).



Fuente: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 36, 1997

2.5.8 Molienda y Clasificación. El mineral transportado, es descargado en la tolva de recepción de la planta de trituración y clasificación, que en su fondo posee un alimentador (vibrante, de cadenas, etc.), que antes de verterlo a la machacadora (de mandíbulas o molino lanzador), lo precriba mediante separador de discos o barras, eliminando parte de las tierras y también fracciones pequeñas de mineral, que son recuperadas mediante una criba que separa el material fino del mineral grueso y tres cintas transportadoras (véase figura 9)³¹.

³⁰CerullaJ., 1997

³¹CerullaJ., 1997

Figura 9. Planta de transporte y triturado de roca.



Fuente: Stone Crushing, Grinding & Screening Machines, 2006

2.5.9 Explotación subterránea. Las características generales de un yacimiento (profundidad, geometría, etc.) pueden determinar que la única alternativa viable sea la minería subterránea. Existe una gran variedad de métodos de explotación, dependiendo fundamentalmente de la geometría del yacimiento (tabular o irregular) y el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Así, la explotación de cuerpos tabulares de materiales competentes (mecánicamente resistentes) suele acometerse mediante los métodos de hundimiento por subniveles o por el de cámaras y pilares. En el caso de rocas incompetentes, se hace necesario disponer rellenos para la sustentación de las labores (métodos de cámara con relleno y cámaras con almacenamiento de zafras). Todas las operaciones llevadas a cabo en profundidad, están conectadas con otras en superficie por una serie de pasadizos abiertos en el material que rodea al depósito, pozos y galerías cruzadas para el paso del personal y la maquinaria de extracción del mineral y drenaje de agua, así como para ventilación.

Pueden establecerse una serie de diferencias fundamentales respecto a la minería a cielo abierto:

- La capacidad de extracción es generalmente mucho más baja que en las explotaciones a cielo abierto.
- La cantidad de estériles producidos por unidad de mineralización extraída es mucho más baja que en minería de superficie.
- En superficie, la extensión de terreno requerida para este tipo de minería es considerablemente menor que para la extracción a cielo abierto.
- Además de los riesgos de fallo mecánico en elementos de superficie (escombreras y diques de balsas), existen riesgos adicionales en este tipo de explotaciones (caída de bloques y colapsos subterráneos)³².

2.6 Residuos de minería no metálica.

En la mayoría de las explotaciones mineras se desarrollan, en mayor o menor medida, una serie de procedimientos rigurosos para conseguir el mayor enriquecimiento del producto a comercializar. Los residuos mineros van a estar caracterizados en cuanto a su tipología por los procesos generadores de los mismos:

2.6.1 Residuos de la extracción. Aquí podemos incluir el suelo vegetal, los terrenos de recubrimiento, la roca estéril y el mineral de baja ley. Salvo los últimos, los demás se tratan simplemente de materiales inertes cuya principal problemática es el gran volumen generado, que precisa grandes escombreras para su disposición en las proximidades del yacimiento. Los minerales de baja ley, también se acopian en escombreras próximas al yacimiento de forma separada a los anteriores ante la previsión de su posterior recuperación³³.

³²Romero E., 2007

³³Romero E., 2007

2.6.2 Residuos del tratamiento. Pueden ser de diversos tipos, variando con el tratamiento sometido a los materiales:

Flotación: Proceso que genera lodos residuales, constituido por una suspensión acuosa de la mena triturada y tratada, a la que se le ha extraído el componente mineral de interés mediante un proceso de flotación diferencial. Contiene también los residuos de los reactivos empleados en el proceso de tratamiento.

- a. Lixiviación: Va a generar residuos constituidos por la MENA triturada y tratada, a la que se le ha extraído el componente de interés mediante disolución con un agente lixivante, que puede ser ácido sulfúrico (en el caso del Cu) o cianuro sódico (en el caso del Au y Ag).
- b. Fundición: Genera residuos constituidos por escorias vítreas (generalmente de composición silicatada y de alta estabilidad que son depositadas en escombreras), “polvos de humo” (materia particulada con alto contenido en metales pesados, resultante de la depuración de las emisiones atmosféricas) y lodos o barros de similar composición.
- c. Refino electrolítico: Genera residuos como los lodos electrolíticos (con alto contenido en metales que pueden ser procesados posteriormente para su recuperación).

Evidentemente, como en toda instalación industrial, en las explotaciones mineras se generan residuos asociados a la maquinaria utilizada en las operaciones (aceites y grasas lubricantes, baterías, líquidos hidráulicos, filtros, etc.). Estos residuos y los derivados de reactivos necesarios para el tratamiento de los

minerales (p. ej. xantatos, ditiofosfato, amilxantato potásico, etc.), tienen sus cauces de gestión como residuos de origen industrial³⁴.

2.7 Impacto ambiental generado por los residuos de minería.

Como previamente se ha expuesto, las operaciones mineras conllevan frecuentemente el uso y transformación de grandes extensiones y volúmenes de terreno. Tanto en la etapa operacional como tras el abandono, se dan una serie de efectos ambientales de mayor o menor magnitud en función de las condiciones locales y el tipo de explotación. Se listan a continuación los principales efectos medioambientales de las actividades mineras, si bien hay que tener presente que no siempre se dan todos y su trascendencia es variable según los casos. Son los siguientes:

- Alteración del paisaje
- Modificación del hábitat ecológico
- Destrucción de cubierta vegetal
- Ruido
- Emisiones de polvo y sedimentación del mismo
- Modificación de cursos de agua
- Modificación de niveles piezométricos
- Generación de residuos
- Contaminación de suelos
- Contaminación de aguas superficiales y subterráneas

También cabe hacer mención a los problemas de seguridad para las personas, especialmente en explotaciones abandonadas. Se deben fundamentalmente a inestabilidad estructural de elementos tales como escombreras, balsas y galerías subterráneas, así como a la existencia de huecos en el terreno sin protección o señalización (p. ej. antiguos pozos de ventilación de galerías).

³⁴Romero E., 2007

La contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas, viene a menudo determinada por la generación de aguas ácidas que frecuentemente se produce en explotaciones metálicas y en la minería del carbón³⁵.

2.8 METODOS DE CARACTERIZACIÓN MINERAL.

2.8.1 Microscopio electrónico de barrido. Se basa en la obtención de una imagen de la muestra a partir del barrido de la misma con un haz de electrones, como resultado de la interacción entre los electrones incidentes y la muestra. El SEM se compone de varios elementos básicos: un cañón de electrones con un filamento emisor de electrones, lentes magnéticas que dirigen y focalizan el haz de electrones sobre la muestra, sistema de barrido, porta muestras móvil y con giro universal, sistemas de obtención de la imagen y de análisis. Para analizar una muestra en el SEM se requieren generalmente condiciones estrictas de vacío en el interior del microscopio, ya que de lo contrario los electrones pueden ser dispersados por las moléculas de aire. Además, los mejores resultados se obtienen con muestras conductoras o convertidas en conductoras gracias a un recubrimiento pelicular con un material (generalmente, grafito; pueden emplearse también oro o aluminio). No obstante, actualmente existen microscopios electrónicos que no precisan, sin recubrimiento de la muestra ni alto vacío en la cámara. Son los denominados microscopios electrónicos ambientales (Environmental Scanning Electron Microscope, ESEM)³⁶.

Las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra originan la emisión de electrones secundarios, de electrones retrodispersados y de rayos X característicos de los elementos presentes en la muestra (para el análisis químico cualitativo y, en algunos casos, semicuantitativo).

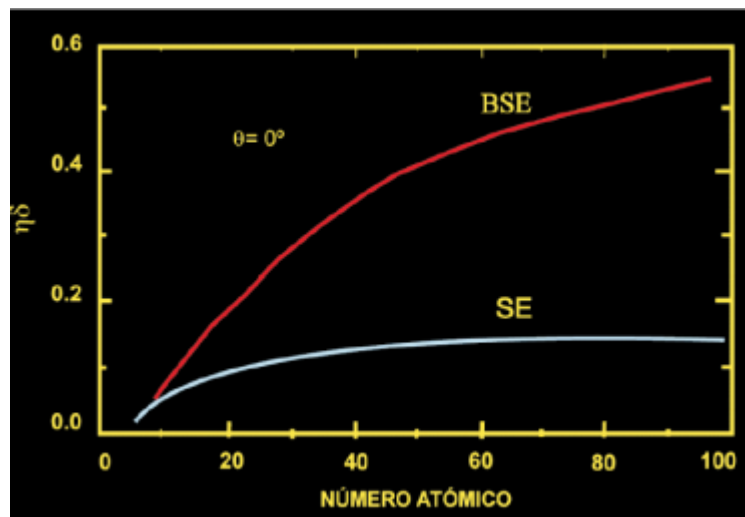
³⁵Romero E., 2007

³⁶Melgarejo J., 2010

En el SEM, diferentes detectores amplifican la señal emitida por la superficie de la muestra cuando es barrida por un delgado haz de electrones. La intensidad de la señal amplificada es visualizada en una pantalla de televisión convencional.

Los electrones secundarios tienen, por convenio, una energía menor de 50 eV. El número de electrones que se produce durante el bombardeo de la muestra varía con el ángulo de incidencia del haz sobre la muestra, pero, en cambio, el número atómico promedio de los elementos presentes en la muestra tiene poca influencia (véase figura 10). En cambio, el número de electrones retrodispersados aumenta casi linealmente con el número atómico Z^{37} .

Figura 10. Comparación del número de electrones retrodispersados (BSE) y secundarios (SE) producidos en las mismas condiciones experimentales en función del número atómico de la muestra.



Fuente: Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 62, p. 1-23, 2010.

³⁷Melgarejo J., 2010

Por consiguiente, si la muestra es rugosa, cada sector de la muestra enviará hacia los detectores una diferente cantidad de electrones secundarios dependiendo de la inclinación de cada sector; en la pantalla, se apreciarán unas zonas iluminadas (correspondientes a zonas que producen muchos electrones secundarios), otras zonas de sombra (zonas que producen pocos electrones con energía menor a 50 eV) y zonas con diferentes claroscuras (con diversas producciones intermedias de electrones secundarios). Es precisamente esta asociación de zonas iluminadas, oscuras y claroscuras lo que da una sensación de relieve. Por consiguiente, los electrones secundarios son ideales para el estudio morfológico de las muestras, alcanzando una resolución que puede ser inferior a 1 nm. Todo ello encuentra aplicación, por ejemplo, en el estudio de detalle de la morfología de granos de arena en un concentrado de batea o el de microcristales en suelos o zonas de alteración, y en el de minerales de las arcillas³⁸.

El número de electrones del haz incidente que son retrodispersados depende de la composición química promedio del mineral excitado. De este modo, cuanto más alto sea el promedio de los números atómicos de los elementos que componen el mineral, tanto mayor será el número de electrones retrodispersados. Por consiguiente, los minerales pesados emiten más electrones retrodispersados que los ligeros, de modo que los detectores captan mucha más intensidad y, por tanto, transmiten a la pantalla una imagen brillante. Así pues, las áreas donde existan más elementos pesados se ven más brillantes y donde aparezcan elementos más ligeros, más oscuras. Por tanto, los detectores de electrones retrodispersados son muy útiles para obtener imágenes de los cambios composicionales (mapas de contraste de Z), obteniéndose los mejores resultados sobre muestras pulidas. Como aplicaciones de estos principios, por ejemplo, destaca la posibilidad de poner de manifiesto zonaciones intracristalinas, incluso aquéllas que puedan ser

³⁸Melgarejo J., 2010

progresivas; también son muy útiles para obtener secuencias de cristalización a microescala³⁹.

2.8.1 Humedad natural. Según Iglesias la humedad natural: Se define como la relación entre el peso de agua y el peso de los granos sólidos, para un volumen unitario. Su valor se expresa en % y puede alcanzar valores mayores del 100%. Donde: W_w : peso de agua W_s : peso de sólidos.

El contenido de agua o de humedad de arenas saturadas oscila entre los valores siguientes: $12\% < \omega < 36\%$. En arcillas se suele obtener: $12\% < \omega < 325\%$. Se debe tener en cuenta que el valor de la humedad se define respecto al peso de la materia sólida y no respecto al peso total, ya que el peso total de una arcilla varía si se seca o se comprime, mientras que el peso de la parte sólida permanece invariable⁴⁰. Para la determinación de la humedad natural se emplean diversos métodos, entre ellos tenemos el horno convencional, el húmedometro conocido como Speedy y por medio del horno microondas entre otros.

Con respecto al método de la determinación de humedad natural mediante el microondas, se han realizado varios estudios obteniendo como resultado 19 artículos y trabajos de grado de gran importancia. Como el reporte técnico RT-10-03/011 realizado por la ingeniera Silvia Angelone, el ingeniero Fernando Martínez y Fernanda Airasca de la Universidad Nacional de Rosario (Argentina), en el cual se determinó el contenido de humedad natural para distintos suelos de forma comparativa entre el horno convencional y el microondas obteniendo resultados aceptables entre los rangos mencionados en las normas existentes⁴¹.

2.8.2 Límites de Atterberg. El límite entre el estado sólido y el plástico se denomina límite plástico y entre el estado plástico y el líquido, límite líquido. Estos

³⁹Melgarejo J., 2010

⁴⁰ Iglesias C., 1997

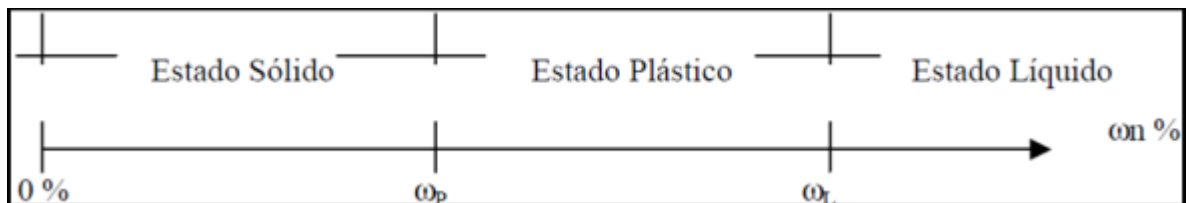
⁴¹ Lucuara K., 2010

se designan genéricamente límites de consistencia o límites de Atterberg en honor del científico sueco que los introdujo. Se entiende por consistencia el grado de resistencia de un terreno de grano fino a fluir o deformarse.

El límite plástico es el límite inferior de la zona en la cual el suelo puede amasarse, y el límite líquido en el límite superior de dicha zona plástica (véase figura 11). La diferencia entre ellos es el índice de plasticidad que da el rango de humedad dentro del cual un suelo determinado se comporta como un material plástico.

$$IP = W_L - W_P = \text{índice plástico}$$

Figura 11. Representación en una semi-recta de los diferentes estados de un terreno (límites de Atterberg).



Fuente: Ing. Julio Roberto Nadeo, Ing. Augusto José Leoni; Grupo Mecánica de suelos y rocas; Facultad Regional la Plata U.T.N, 2009.

La propiedad de la plasticidad es un atributo solamente de los minerales arcillosos el polvo de cuarzo, por ejemplo, no es plástico, cualquiera sea el grado de fineza de sus partículas. Como prácticamente todos los suelos finos contienen minerales arcillosos, los mismos son por consiguiente plásticos.

El límite líquido da una medida de la resistencia al corte que posee un suelo mezclado con agua. En otras palabras, mide la verdadera cohesión potencial de un material que, a su vez, depende de la superficie total de sus áreas de contacto, es decir, de la finura y forma de sus granos. Cuanto más pequeños y más aplanados

son los granos de una arcilla, mayor es el área total de contacto entre los granos y mayor la cantidad de agua necesaria para revestirlos, por ello, el límite líquido es más alto. El límite líquido de una arcilla disminuye con el agregado de arena o limo. El límite plástico disminuye al mismo tiempo, pero no tan rápidamente como el límite líquido, de forma que la adición de partículas gruesas causa un descenso del índice plástico, debemos recordar que para las arenas, el índice plástico es cero ya que no se pueden determinar los límites extremos (Plástico y Líquido). El límite plástico está fuertemente afectado por el contenido orgánico del suelo que eleva su valor, sin elevar simultáneamente el valor del límite líquido. Por dicha causa, los suelos con contenido orgánico tienen bajos índices plásticos y límite líquido relativamente altos⁴².

⁴²Nadeo J et. al., 2013

3. METODOLOGIA

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos es necesaria la ejecución de estudios basados en la aplicación de una metodología orientada, la cual se plantea en las etapas descritas a continuación:

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La recolección de información bibliográfica se hizo durante todo el tiempo de desarrollo del proyecto. Durante esta fase se acudió a la consulta y recolección bibliográfica de publicaciones en diferentes bases de datos, dentro de estas ScienceDirect, también publicaciones dentro de las que se encontraron libros, revistas, trabajos de grado de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander y material de circulación libre encontrado en Internet. Esta consulta permitió reforzar los conocimientos del tema, despejar las dudas que se presentaron con el desarrollo del proyecto.

La utilización de yeso en porcentajes de 2.5, 5, 7.5 y 10 como agente estabilizador de suelos arcillosos expansivos (Işık Yılmaz et. al., 2009); la aplicación de cal en 1 y 3 por ciento en peso ó entre 2 y 8 por ciento para disminuir la plasticidad de suelos arcillosos (S. Eren et. al., 2009) y la publicación donde se realizan mezclas de cal-yeso con un curado de 306 días para disminuir la presión de hinchamiento (Bell et. al., 1994) y la revisión de otras fuentes de información permitieron reconocer los estudios previos en estabilización para suelos arcillosos y a comprobar que aún no se ha implementado los residuos de minería del yeso como materiales estabilizadores de suelos arcillosos.

3.2 RECOLECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En esta fase de la investigación se recogieron los tres materiales involucrados en la investigación, el residuo de minería, el cemento y el suelo, para después ser transportados a los diferentes laboratorios para su posterior caracterización.

3.2.1 Recopilación de muestras. Durante esta fase se hizo una visita de campo en donde se tuvo acceso a la mina “El Diviso” ubicada en La Mesa de Los Santos en Santander en el corregimiento del mismo nombre perteneciente al Municipio de Los Santos, se encuentra sobre la base de la formación Rosa blanca, en esta se pueden identificar 2 tipos de rocas principalmente yeso y material estéril constituido por Lutita Calcárea que encontramos de dos formas: fisiles y unas más compactas, cerca al área encontramos también calizas pero este material no se considera rentable porque está muy sectorizado y en poca cantidad las coordenadas geográficas de la mina son $6^{\circ}45'50.36''N$ $73^{\circ}11'04.58''O$ se encuentra a una altura de 619 metros sobre el nivel del mar. El error de los datos tomados en la zona es de +/- 12 metros. Al frente encontramos el Río Chicamocha que se intersecta en ese punto con el Río Suarez para formar el Río Sogamoso. En esta se extrajo el material objetivo de estudio y se tomaron datos para conocer la geología de la zona, durante el trabajo de campo se reconoció y selecciono el material y las muestras representativas que serían la base del estudio. La recolección de muestras de la mina “El Diviso”, se hizo tomando muestras del material estéril de la mina que se obtuvo directamente de los botaderos (véase figura 12),

Figura 12. Botadero de residuos de minería ubicado a un costado de la mina El Diviso.



Fuente: Los autores.

También se ingresó a esta y se obtuvieron muestras frescas de las tres litologías presentes: yeso y dos tipos de estériles encontrados que corresponden a lutitas, el material seleccionado y muestreado fue trasladado a las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander para la realización de los estudios.

El otro tipo de material se tomó sobre la vía Curos-Málaga (véase figura 13). El criterio de selección de la zona donde fue extraído el suelo arcilloso, fue la condición crítica del estado de la vía tanto en temporada de verano como en invierno, en los días con fuertes precipitaciones los hundimientos de la carretera y los deslizamientos dan lugar a una alta inestabilidad e irregularidades que afectan el tránsito vehicular y las poblaciones aledañas. Se realizaron tres apiques sobre la vía Curos-Málaga a unos 12,4 kilómetros del desvío de curos, las coordenadas geográficas del primer apique son $6^{\circ}57'34.25''\text{N}$, $72^{\circ}58'33.98''\text{O}$ a 1788 metros de altura con un error de ± 12 metros. Las dimensiones de cada uno de los apiques fue de 30 centímetros de diámetro por 30 centímetros de profundidad, se realizaron en intervalos de 500 metros sobre la margen derecha de la carretera (véase figura 14).

Figura 13. Vía Curos-Málaga en temporada seca (a) y en temporada de lluvia (b).



Fuente: los autores.

La sub-base que se hallaba sobre la vía fue retirada para poder realizar los apiques, y posteriormente recolectar 25 kilos de muestra, los que fueron transportados a las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander para realizar los ensayos.

Figura 14. Apique realizado sobre la vía Curoso-Málaga.



Fuente: Los autores.

3.2.2 Preparación de las Muestras. Después de realizada la fase de campo, se recolecto el material de interés en la Mina El Diviso ubicada en la Mesa de Los Santos, Santander. Este fue transportado hasta los laboratorios de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Otra cantidad de material (5 bultos) exclusivamente de Lutita compactas fue transportado hasta la planta de CEMEX en la ciudad y de ahí hasta la UIS. Una vez en los laboratorios se procedió a partir los bloques con una porra de 16 libras hasta dejar las muestras a un tamaño ideal para que este pudiera pasar por la trituradora de mandíbulas BB200 RETSCH que se encuentra en el laboratorio de molienda y trituración de la Escuela de Geología. Del material triturado se obtuvieron 1500 gramos de muestra tamiz 200 transportados a los laboratorios de Difracción de Rayos X en

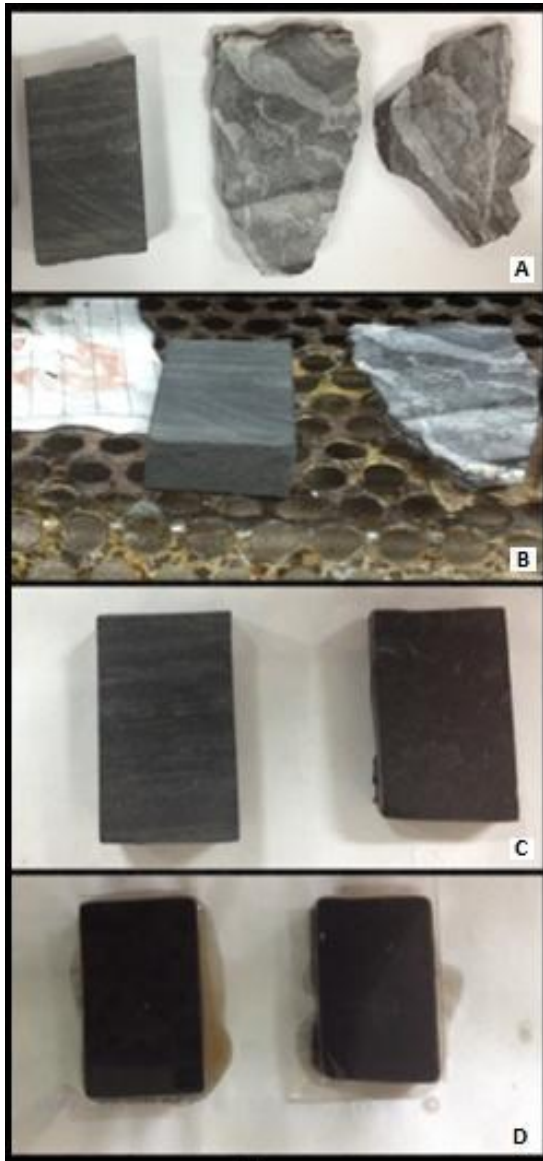
Guatiguará y a los Laboratorios de hormigón simple de la Escuela de Ingeniería Civil para la posterior realización de las aditivaciones de los suelos inestables.

3.2.3 Secciones Delgadas. Se tomó una de los dos muestras de residuo de minería (Lutita Compacta) y se llevo hasta el laboratorio de Geología para realización de secciones delgadas, en donde se cortó, pulió y fueron aplicados todos los procedimientos para la elaboración de la sección (figura 15), que posteriormente fue analizada en el laboratorio de petrografía de la Escuela de Geología

3.2.4 Caracterización Química. Se tomó una muestra de Lutita Compacta encontrada en la Mina El Diviso y una muestra de suelo de la vía Curos-Málaga, y a las instalaciones de Guatiguará de la UIS en Piedecuesta, Santander para hacer las pruebas de Difracción de rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido. Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 μm (400 mesh).

Para el caso de la 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 difractor de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría Da Vinci.

Figura 15. Proceso de elaboración de secciones delgadas. A) Se pule la muestra hasta obtener una superficie lisa. B) Se introduce en el horno. C) se pule la muestra para poder ponerle el vidrio. C) se pega el vidrio para seguir el proceso de pulido y llevar la sección a un valor igual o cercano de 2 micras.



Fuente: los autores.

3.2.5 Humedad natural y Límites de Atterberg. Se tomaron 100 gramos de muestra que aún conservaba la humedad natural de donde fue recolectada; la

muestra se pesa junto con una tara de peso conocido para luego ser llevada a un horno donde permanece durante 4 horas; para finalizar se registra el peso final. El cociente de los pesos multiplicado por 100 determina el porcentaje de humedad.

Para el límite plástico Se agrega un poco de agua al suelo que ha pasado por el tamiz 200, luego se amasa entre la palma de la mano y una superficie lisa, formando un cilindro hasta la aparición de grietas (véase figura 16). Cuando el cilindro empieza a presentar grietas con un diámetro aproximado de 3 mm, se dice que el material tiene la humedad correspondiente al límite plástico. El ensayo se hace con 4 taras previamente pesadas, las cuales son llenadas cada una con 25 gramos del material que según las grietas ya ha alcanzado la humedad del límite plástico.

Figura 16. Elaboración de los cilindros de suelo para el límite plástico.



Fuente: Los autores.

Seguido a esto, se toma el peso de las 4 taras con los 25 gramos de material en una gramera digital, para llevarlas posteriormente a una temperatura de 100°C en un horno, donde se mantienen durante 45 minutos, para eliminar la humedad. Para terminar, se retiran las taras del horno y se pasan a la gramera una vez más para registrar su nuevo peso.

Seguido de esto se determina el límite líquido con la cuchara de Casagrande. En un recipiente de cerámica se amasan 300 gramos de suelo ligeramente húmedo y con éste material se rellena la parte inferior de la cuchara. Luego se hace una abertura con un ranurador y se da un número determinado de golpes a la cuchara hasta que la ranura se cierre; en ese momento se toma un centímetro de material en el punto que ocurrió el cierre y se deposita en una tara (véase figura 17).

Figura 17. Ensayo de límite líquido en cuchara de Casagrande.



Fuente: Los autores

Los golpes se dan dejando caer la cuchara sobre la base desde una altura fija que trae el aparato. El número de golpes está dado por los siguientes intervalos; 40-50 para la primera abertura; 30-40 para la segunda, 20-30 para la tercera, y 10-20 para la última. A medida que se agrega agua al material, en cada intento

disminuye el número de golpes necesario para que la abertura se una en un punto.

Seguido esto, las taras se pesan, para luego llevarlas al horno donde permanecen 45 minutos a una temperatura de 100°C con el fin de eliminar humedad y para terminar se sacan del horno y se registra el nuevo peso.

Finalmente, con los datos de peso suelo húmedo, suelo seco, y número de golpes por intervalo, se determina el límite líquido por medio de la misma hoja de cálculo empleada para calcular el límite plástico.

3.3 ADITIVACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUELO MODIFICADO

3.3.1 Aditivación del suelo. Para la aditivación del suelo, se adicionó el residuo de lutita compacta y cemento portland, en las siguientes combinaciones (véase la tabla1). Para realizar cada una de las 8 aditivaciones se utilizaron 300 gramos de suelo, este se mezcló con diferentes cantidades de lutita compacta y cemento portland, las cantidades en gramos de los materiales adicionados al suelo se muestran en orden en tabla 1, luego de realizar las 8 mezclas, estas fueron depositadas en frascos de vidrio donde tuvieron un curado de 7 y 14 días. El término curado se refiere a la permanencia de las mezclas dentro de los frascos cerrados a una temperatura ambiente durante la cantidad de días mencionada anteriormente.

Después de hacer las aditivaciones y de haber cumplido su tiempo de curado, se eligieron dos muestras para realizarles los siguientes ensayos: índice de plasticidad, Difracción de rayos X y SEM en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará.

Tabla 1. Combinaciones utilizadas para la aditivación del suelo inestable.

| COMBINACIÓN | LUTITA COMPACTA | CEMENTO | TIEMPO |
|--------------------|----------------------------|----------------|---------------|
| 1 | 1,0 | 0 | 7 |
| 2 | 1,0 | 0.5 | 7 |
| 3 | 0.5 | 1.0 | 7 |
| 4 | 0 | 1.0 | 7 |
| 5 | 1.0 | 0 | 14 |
| 6 | 1.0 | 0.5 | 14 |
| 7 | 0.5 | 1.0 | 14 |
| 8 | 0 | 1.0 | 14 |

Fuente: Los autores.

3.3.2 Interpretación De Los Resultados. Durante esta fase se procedió a analizar los resultados de las pruebas realizadas.

3.4 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Esta fase comprende la elaboración del informe final en donde quedaran plasmados los resultados del trabajo realizado durante el desarrollo del proyecto.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

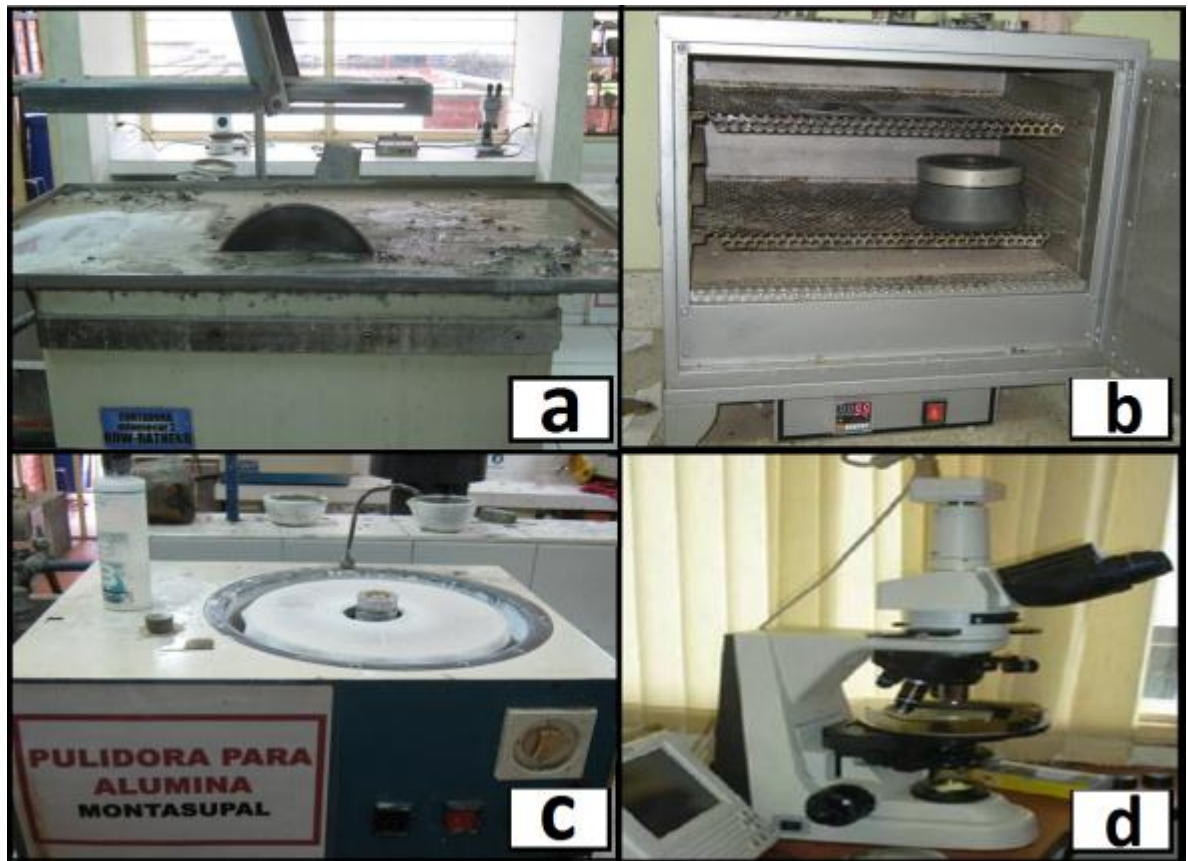
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Se realizaron varios tipos de análisis en diferentes laboratorios de la Universidad Industrial de Santander con el fin de conocer las propiedades físicas y químicas de los materiales.

4.1.1 Caracterización de la Lutita Compacta. Para la caracterización de la lutita compacta se realizó petrografía de la muestra, difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

4.1.1.1 Petrografía. Se realizó el análisis petrográfico del residuo de minería para este caso lutita compacta, la cual fue elegida para la realización de las aditivaciones. Las secciones delgadas se elaboraron en el laboratorio de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. La elaboración de la lámina delgada y su correspondiente estudio mineralógico-petrográfico, se llevó a cabo en los laboratorios de preparación de muestras y en el laboratorio de microscopía óptica de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Los implementos usados para la elaboración de la sección delgada son: Cortadora de rocas (figura 17 a), Horno de secado (figura 17 b), pulidora de rocas (figura 17 c), el análisis de la muestra se realizó en un microscopio de luz transmitida en el laboratorio de petrografía de la escuela de geología (figura 17 d).

Figura 17. Implementos para la elaboración y descripción de una sección delgada



Fuente: Los autores

Muestra Lutita compacta (residuo de minería).

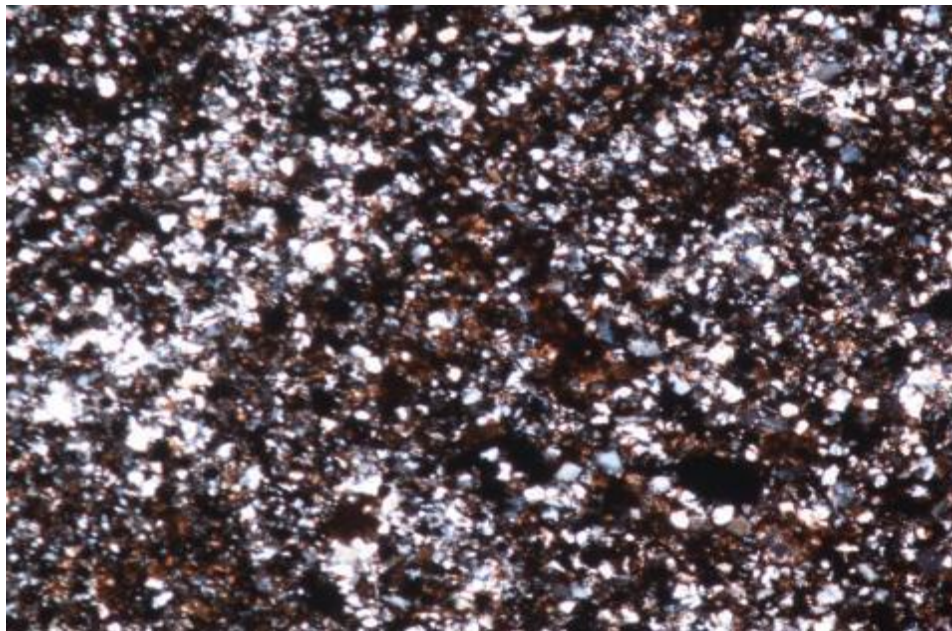
6°45'50.36"N 73°11'04.58"O

Tabla 2. Análisis de la sección delgada, mina El Diviso, Los Santos, Santander.

| | | | |
|----------------------|---|----------------------|-----------------|
| Ubicación. | | | |
| | 6°45'50.36"N | 73°11'04.58"O | 619 msnm |
| Tipo de roca. | Roca sedimentaria | | |
| Clase | Química | | |
| Mineralogía | Cuarzo, Calcita, Yeso, Ortoclasa, Moscovita. | | |

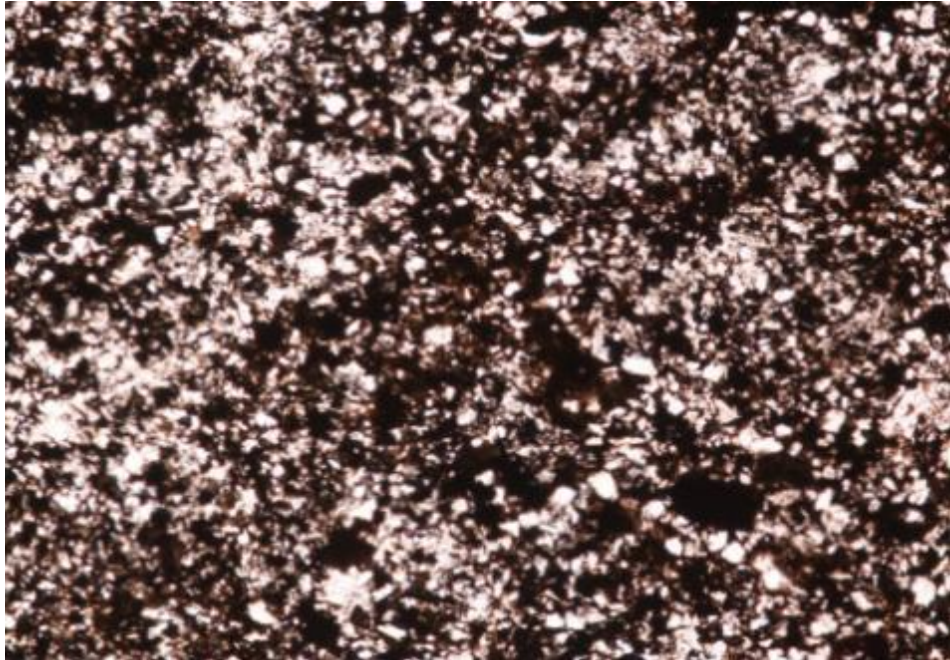
| | |
|----------------------|--|
| Descripción | En el microscopio con un aumento de 5x se observaron cristales de cuarzo, principalmente anhedrales, los cristales de calcita y yeso son de menor tamaño que los de cuarzo y aparecen distribuidos de manera uniforme en la sección; también se observan micas como moscovita y algunos cristales de ortoclasa. En la muestra se evidencian algunos óxidos pero su debido a su tamaño fue difícil clasificarlos. |
| Clasificación | Lutita Calcárea según Folk (1972). |

Figura 18. Foto tomada desde el microscopio de luz transmitida en nicols cruzados.



Fuente: Los Autores.

Figura 18. Foto tomada desde el microscopio de luz transmitida en nicoles paralelos.



Fuente: Los autores.

4.1.1.2 Difracción de rayos X (DRX). Para ejecutar esta parte del proyecto se cortó y posteriormente se pulverizó una muestra de lutita compacta procedente de la Mina “El Diviso”, la cual fue llevada a los laboratorios de la UIS en la sede Guatiguará donde se le realizó los siguientes procedimientos.

Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría Da Vinci bajo las siguientes condiciones (véase tabla 3).

Tabla 3. Condiciones para la toma de datos DRX de lutita compacta y del suelo arcilloso.

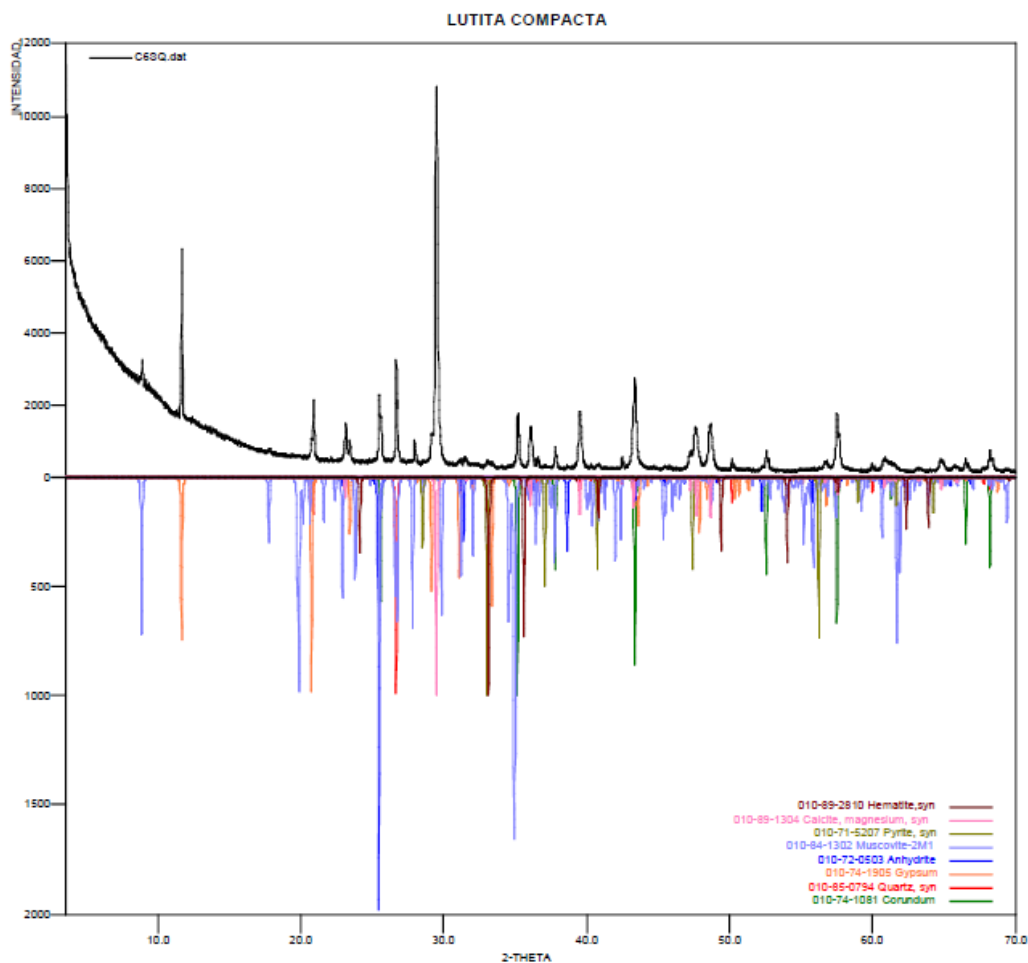
| | |
|-----------|--------|
| Voltaje | 40(kV) |
| Corriente | 30(mA) |

| | |
|--------------------------|-----------------|
| Rendija de Divergencia | 0.6mm |
| Rendijas Soller Primario | 2.5° |
| Muestreo | 0.01526° 2theta |
| Rango de Medición | 3.5-70° 2theta |
| Radiación | CuKα1 |
| Filtro | Níquel |
| Detector | Lineal LynxEye |
| Tipo de barrido | A pasos |
| Tiempo de muestreo | 0.4 segundos |

Fuente: Laboratorio de difracción de rayos X en Guatiguará.

En la figura 19 y la tabla 4 se presentan los resultados del DRX realizado a la muestra de lutita compacta.

Figura 19. Difractograma correspondiente a la Lutita Compacta (C6SQ).



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

Tabla 4. Resultados de DRX para la Lutita Compacta (C6SQ). N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible refinar sus datos cristalográficos necesarios para su respectiva cuantificación). D.E = Desviación estándar.

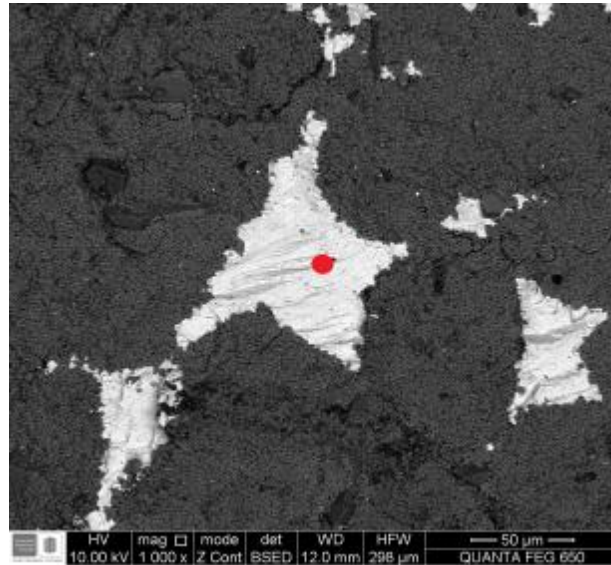
| | FASE | NOMBRE | CUANTITATIVO (D.E) |
|------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Cristalinos | $Fe S_2$ | Pirita | <1 % |
| | $Si O_2$ | Cuarzo | 6.1 % (0.1) |
| | $Ca (SO_4)$ | Anhidrita | 4.7 % (0.1) |
| | $Fe_2 O_3$ | Hematita | N.C |
| | $Ca (SO_4) (H_2 O)$ | 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: Laboratorio de Difracción de Rayos X UIS, Guatiguará.

En el Difractograma representado en la figura 19 y la tabla 4, se puede observar el predominio en porcentaje de la calcita magnesiana entre los materiales cristalinos de la muestra; los minerales sulfato como la anhidrita y el yeso, se encuentran en proporciones menores al igual que el cuarzo; también se destaca la presencia de moscovita como el único representante del grupo de los filosilicatos en un porcentaje menor al 2 %. El contenido de materiales amorfos y otros equivale al 41,6 %.

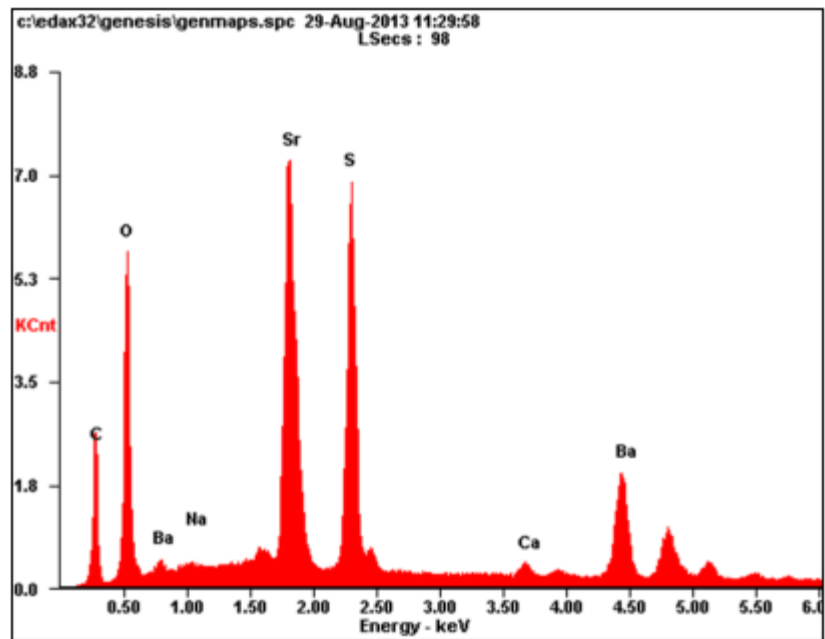
4.1.1.3 Microscopía electrónica de barrido. A continuación se muestran las respectivas imágenes, tablas y espectrogramas, correspondientes al análisis SEM realizado a la muestra de lutita compacta; en cada imagen se enfoca el fragmento sobre el que se realiza el análisis de composición que aparece en las tablas y espectrogramas.

Figura 20. Imagen del SEM realizado a la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 1.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 21. Espectrograma la composición química muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 1.



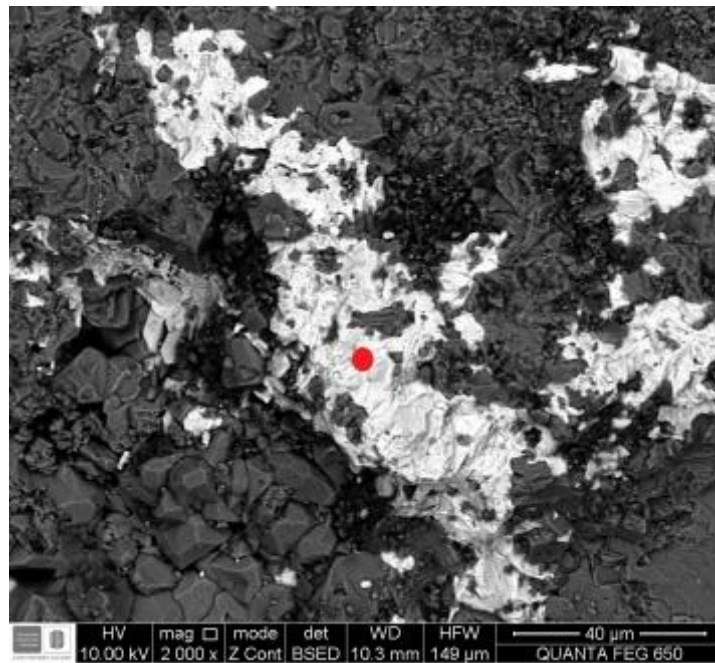
Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará

Tabla 5. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente de la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 1.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 21.85 | 44.51 |
| <i>OK</i> | 23.21 | 35.50 |
| <i>NaK</i> | 00.27 | 00.28 |
| <i>SrL</i> | 22.29 | 06.23 |
| <i>SK</i> | 12.76 | 09.74 |
| <i>CaK</i> | 00.56 | 00.34 |
| <i>BaL</i> | 19.07 | 03.40 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

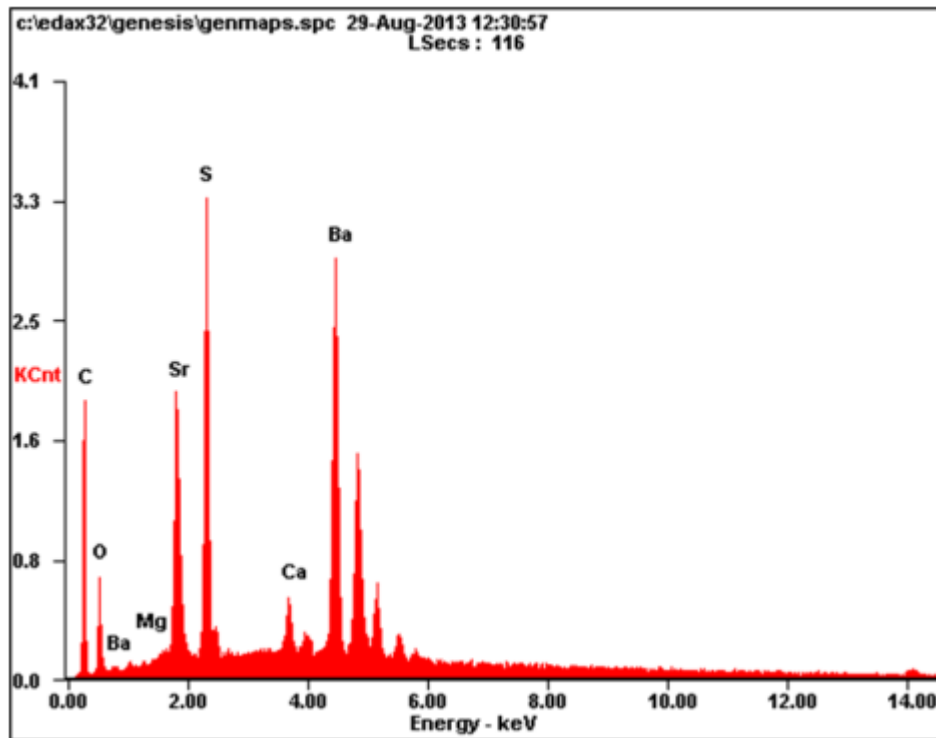
Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 22. Imagen del SEM realizada a la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 2.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 23. Espectrograma la composición química muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 2.



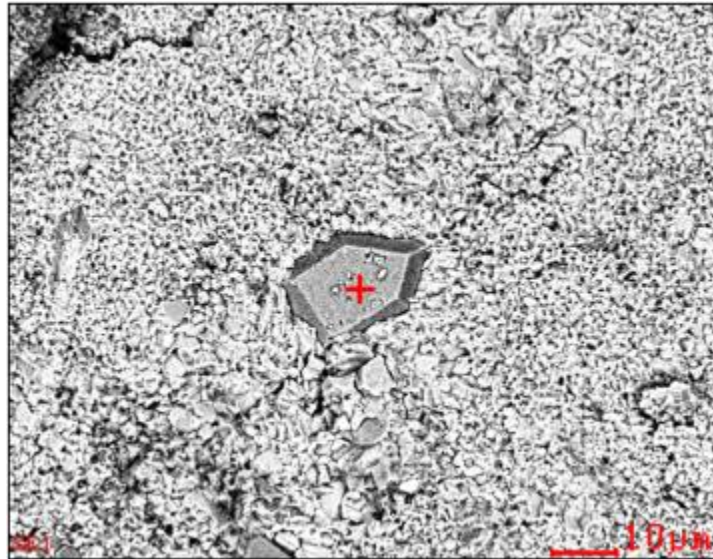
Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Tabla 6. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente de la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 2.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 25.24 | 65.35 |
| <i>OK</i> | 04.54 | 08.83 |
| <i>MgK</i> | 00.12 | 00.16 |
| <i>SrL</i> | 11.81 | 04.19 |
| <i>SK</i> | 09.95 | 09.65 |
| <i>CaK</i> | 01.61 | 01.25 |
| <i>BaL</i> | 46.73 | 10.58 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

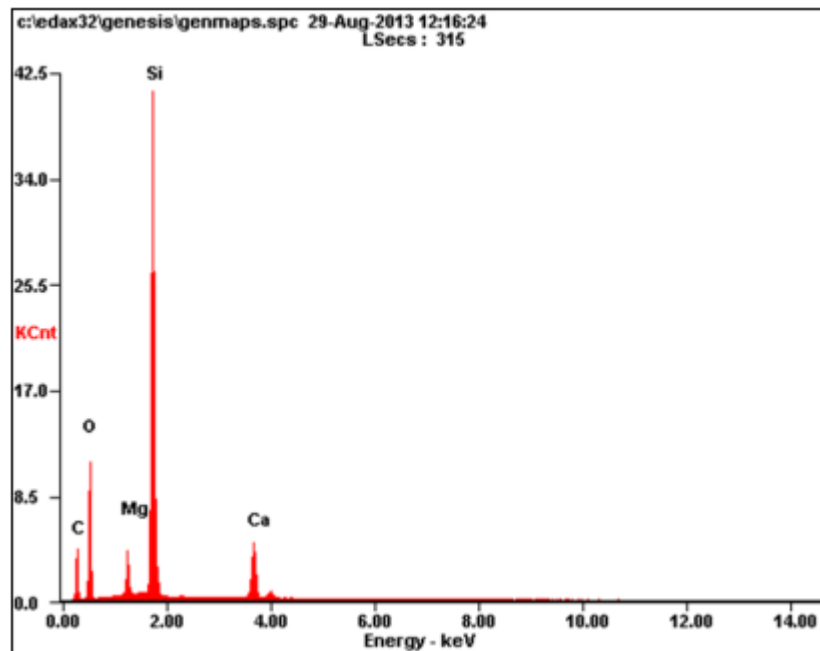
Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 24. Imagen del SEM realizado a la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 3.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 25. Espectrograma la composición química muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 3



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Tabla 7. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente de la muestra de Lutita compacta (C6SQ) enfoque 3.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 23.39 | 35.68 |
| <i>OK</i> | 31.34 | 35.89 |
| <i>MgK</i> | 03.22 | 02.43 |
| <i>SiK</i> | 34.73 | 22.66 |
| <i>CaK</i> | 07.31 | 03.34 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

En las imágenes del microscopio electrónico de barrido (SEM) para la lutita compacta, se hicieron 3 enfoques en diferentes partes de la muestra, con el ánimo de diferenciar por tonalidades la composición química de los metales, pues con la intensidad de grises, varía la concentración de los elementos metálicos, es decir, en las partes más claras de la muestra, la concentración de metales pesados es alta, mientras que en las zonas más oscuras, su concentración es baja y predominan otro tipo de elementos. En los enfoques 1 y 2 del análisis de microscopía de barrido (SEM) realizado a la muestra de lutita, fueron hechos en tonalidades claras, por esto, aparecen valores altos de metales alcalinotérreos como el estroncio y el bario, también se destaca la presencia de azufre y oxígeno en ese punto de la muestra; el Silicio no registra porcentaje. El enfoque 3 se realizó en un punto de la muestra con un tono más grisáceo, allí aparece el Silicio como elemento predominante, permanece en la muestra y los metales que predominaban en los enfoques anteriores, no registran en el espectrograma. En las tablas 5,6 y 7 correspondientes a los porcentajes de cada elemento presente en la muestra, aparece una letra k acompañando a los elementos químicos, el significado de esa letra está relacionado con la energía del elemento y ubicación en su respectivo nivel.

4.1.2 Suelo arcilloso. Para la caracterización del suelo arcilloso recolectado en la vía Curos-Málaga, se realizó humedad natural, límites de Atterberg, difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

4.1.2.1 Humedad natural. Teniendo en cuenta la información utilizada en la metodología de este trabajo, se obtuvo un valor de humedad relativa de un 8,6 %.

4.1.2.2 Límite plástico. Los datos utilizados para el cálculo de éste límite fueron recopilados en el laboratorio de Ingeniería Civil durante el ensayo descrito en la metodología (véase tabla 8).

Tabla 8. Datos de los diferentes pesos en gramos, necesarios para hallar el límite plástico del suelo arcilloso.

| DATOS LIMITE PLASTICO | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| TARA N° | 43 | 45 | 46 | 47 |
| P1 W tara + W suelo húmedo | 41 | 40,89 | 40,4 | 40,8 |
| P2 W tara + W suelo seco | 35,2 | 35,22 | 34,7 | 35,5 |
| P3 W tara | 15,76 | 15,84 | 15,41 | 15,85 |

Fuente: Los autores.

Utilizando los datos que aparecen en la tabla 8 y con la ayuda de una hoja de cálculo se pudo determinar el límite plástico del suelo arcilloso (véase tabla 9). La hoja para los cálculos fue suministrada por el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela de Ingeniería Civil – UIS. Luego de realizar las operaciones se obtiene los siguientes valores:

Tabla 9. Límite plástico del suelo arcilloso.

| TARA | PESO TARA(g) | PESO TARA + SUELO HUMEDO (g) | PESO TARA + SUELO SECO(g) | PESO DEL AGUA(g) | PESO SUELO SECO(g) | CONTENIO DE AGUA% |
|------|--------------|------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| 47 | 15,85 | 40,8 | 35,5 | 5,3 | 19,65 | 26,97 |
| 43 | 15,76 | 41 | 35,2 | 5,8 | 19,44 | 29,84 |
| 45 | 15,84 | 40,89 | 35,22 | 5,67 | 19,38 | 29,26 |
| 46 | 15,41 | 40,4 | 35,1 | 5,3 | 19,69 | 26,92 |

Fuente: Los autores en colaboración con el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería civil.

Promediando los 4 valores del contenido de agua en porcentaje presentados en la tabla anterior se obtiene el límite plástico; igual al 28%.

4.1.2.3 Límite líquido. Los datos empleados para el cálculo de éste límite fueron recopilados en el laboratorio de Ingeniería Civil durante el ensayo descrito en la metodología (véase tabla 10).

Tabla 10. Datos de los diferentes pesos en gramos y número de golpes necesarios para hallar el límite líquido del suelo arcilloso.

| DATOS LIMITE LIQUIDO DEL SUELO | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| INTERVALO | 40/50 | 30/40 | 20/30 | 10/20 |
| NUMERO DE GOLPES | 49 | 38 | 25 | 18 |
| TARA N° | 1 | 2 | 3 | 4 |
| P1 W tara + W suelo húmedo | 25,45 | 22,53 | 22,12 | 28,15 |
| P2 W tara + W suelo seco | 21,52 | 19,23 | 18,85 | 23,28 |
| P3 W tara | 6,87 | 7,07 | 7,13 | 7,42 |

Fuente: Los autores.

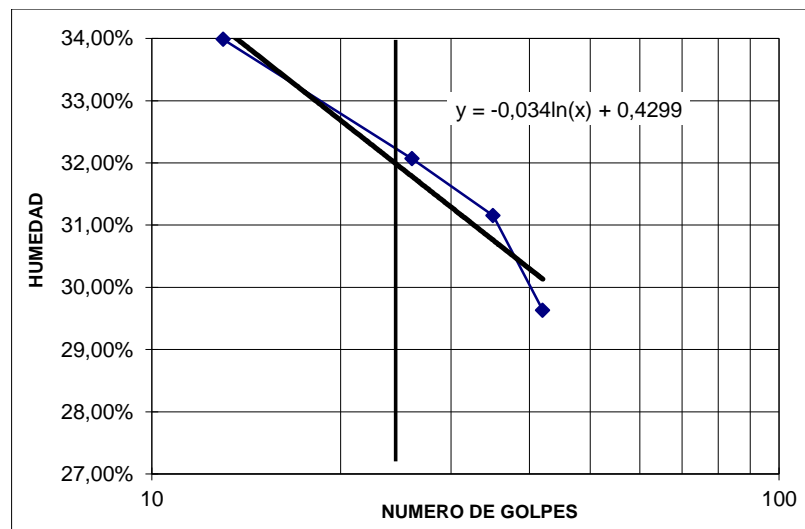
Tabla 11. Valores de peso en gramos, porcentajes de contenido de agua para las cuatro taras utilizadas en el límite líquido.

| TARA | N ° DE GOLPES | PESO TARA(g) | PESO TARA + SUELO HUMEDO(g) | PESO TARA + SUELO SECO(g) | PESO DEL AGUA(g) | PESO SUELO SECO(g) | CONTENIDO DE AGUA(g) |
|------|---------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 42 | 8,48 | 23,88 | 20,36 | 3,52 | 11,88 | 29,63% |
| 2 | 35 | 8,3 | 27,75 | 23,13 | 4,62 | 14,83 | 31,15% |
| 3 | 26 | 8,8 | 32,81 | 26,98 | 5,83 | 18,18 | 32,07% |
| 4 | 13 | 7,3 | 28,47 | 23,1 | 5,37 | 15,8 | 33,99% |

Fuente: Los autores en colaboración con el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería civil.

Los valores correspondientes al contenido de agua en la tabla anterior y el número de golpes de cada intervalo se grafican (véase figura 26), para generar una línea de tendencia que ayuda a encontrar el límite líquido.

Figura 26. Gráfica de humedad vs número de golpes, el corte entre la línea vertical más oscura y la línea diagonal negra indica el valor del límite líquido.



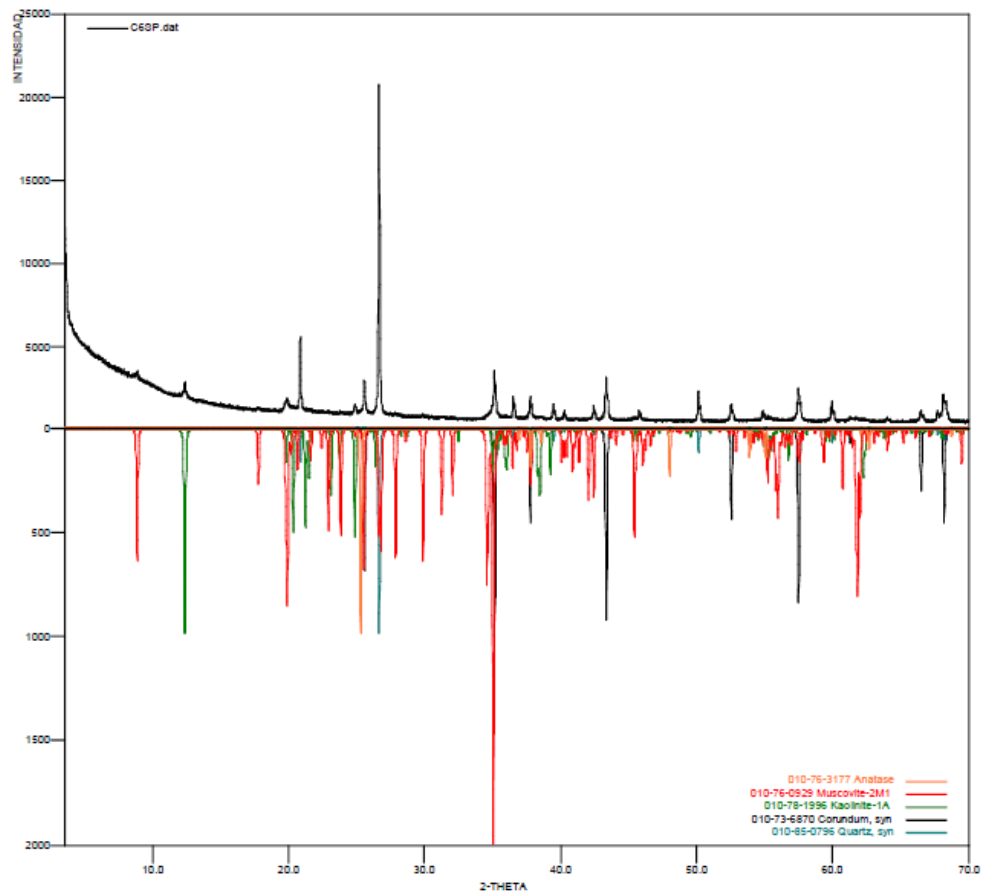
Fuente los autores.

Con esto se determina que el límite líquido tiene un valor de 32 %.

Para el cálculo del índice de plasticidad la diferencia entre el límite líquido y plástico da como resultado el valor del índice de plasticidad y no utilizan decimales, para este caso es de 4%.

4.1.2.4 Difracción de rayos X (DRX). Para la ejecución de esta parte de la investigación se recolectó una muestra de suelo arcilloso en la vía Los Curos - Málaga, ésta se llevó a los laboratorios de la UIS en la sede Guatiguará donde se le realizó los siguientes procedimientos. Las condiciones del estudio están descritas en el ensayo de la Lutita compacta (véase tabla 3).

Figura 27. Difractograma correspondiente al suelo arcilloso (C6SP).



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

Tabla 12. Resultados de DRX para el suelo arcilloso (C6SP). N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible refinar sus datos cristalográficos necesarios para su respectiva cuantificación). D.E = Desviación estándar.

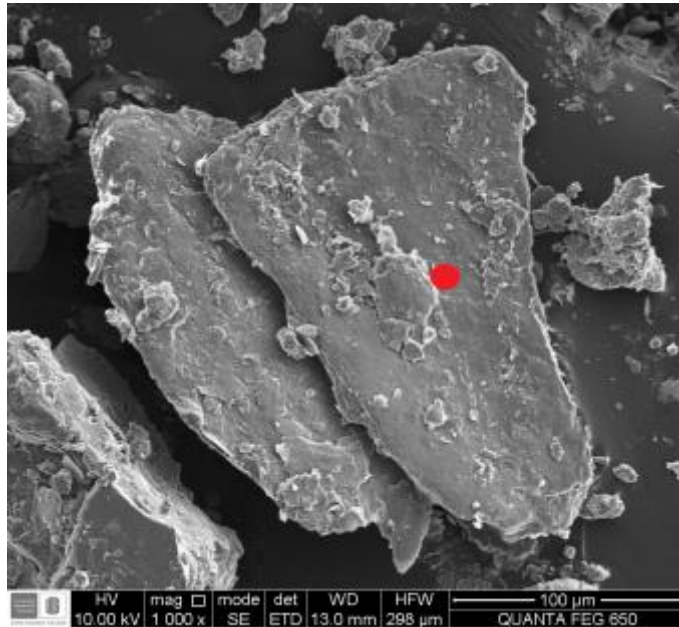
| | FASE | NOMBRE | CUANTITATIVO (D.E) |
|--------------------|----------------------------------|-----------|--------------------|
| Cristalinos | $Ti O_2$ | Anatasa | N.C |
| | $Si O_2$ | Cuarzo | 24.2 % (0.2) |
| | $Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$ | Caolinita | 3.7 % (0.2) |
| | $K Al_2 Si_3 Al O_{10} (OH)_2$ | Moscovita | 10.2 % (0.3) |
| | Total Cristalino | | 38.1 % |
| | Amorfos y otros | | 61.9 % |

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

En el Difractograma representado en la figura 27 y la tabla 12, se destaca la presencia de sólo 3 minerales constituyentes, predomina el cuarzo como el material cristalino de mayor porcentaje en la muestra; por el grupo de las micas aparece la moscovita, cuyo porcentaje ocupa el segundo lugar en el contenido total materiales cristalinos en el suelo. El carácter arcilloso del suelo se puede atribuir a la caolinita, cuyo porcentaje es bajo, y se puede relacionar con el bajo índice de plasticidad del suelo, con un valor de 4, que lo clasifica como ligeramente plástico. Se resalta que aproximadamente el 62 % del suelo corresponde a material amorfo y otros no cristalinos.

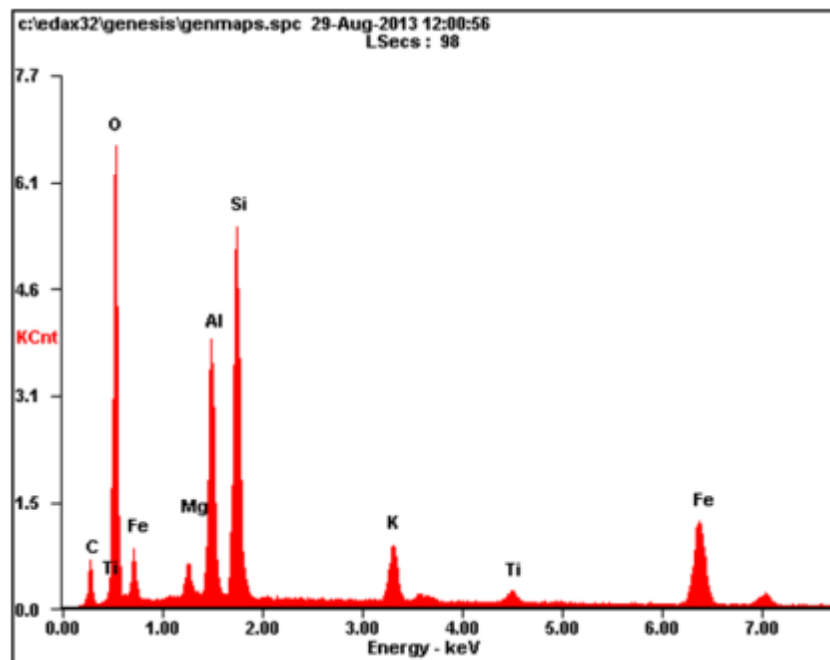
4.1.2.5 Microscopía electrónica de barrido. A continuación se muestran las figuras 28-29 y la tabla 13, correspondientes al análisis SEM y al DRX realizado a la muestra de suelo arcilloso; en la imagen se enfoca el fragmento sobre el que se realiza el análisis de composición que aparece en la tabla y espectrograma.

Figura 28. Imagen del SEM realizado al suelo arcilloso (C6SP).



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 29. Espectrograma de la composición química del suelo arcilloso (C6SP).



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Tabla 13. Porcentajes atómico y de peso de cada elemento constituyente del suelo arcilloso (C6SP).

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 09.44 | 16.92 |
| <i>OK</i> | 36.26 | 48.76 |
| <i>MgK</i> | 01.81 | 01.60 |
| <i>AlK</i> | 11.73 | 09.35 |
| <i>SiK</i> | 18.38 | 14.08 |
| <i>KK</i> | 03.64 | 02.00 |
| <i>TiK</i> | 01.20 | 00.54 |
| <i>FeK</i> | 17.54 | 06.76 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará

En el análisis SEM del suelo, generado para la determinación de su composición química, se realizó un enfoque en un punto de la muestra con tonalidad clara, allí se evidenció el predominio del oxígeno y el silicio, algunos metales alcalinos como el potasio y alcalinotérreos como el magnesio, los cuales contribuyen al carácter subalcalino del suelo; el hierro y el aluminio fueron los elementos metálicos del suelo que presentaron mayor porcentaje en peso.

4.1.3 Aditivaciones de suelo con lutita compacta y cemento. De acuerdo con la matriz de diseño que se realizó para establecer una reacción puzolánica, se fijaron las siguientes condiciones:

- Tiempo de curado durante los días 7 y 14 a 25 °C
- Los materiales a reaccionar son: Lutita compacta, cemento y suelo, los cuales se identifican como los factores que intervienen en el diseño, presentando un valor máximo y mínimo del 1,0% y 0,5% respectivamente (véase tabla 14); estos valores se establecen para la evaluación de la

modificación del suelo, utilizando un material residual (lutita compacta) proveniente del yeso, al cual, mediante ésta investigación, se le dará un valor agregado en estabilización de suelos.

Tabla 14. Aditivaciones con diferentes tipos de material y tiempo de curado.

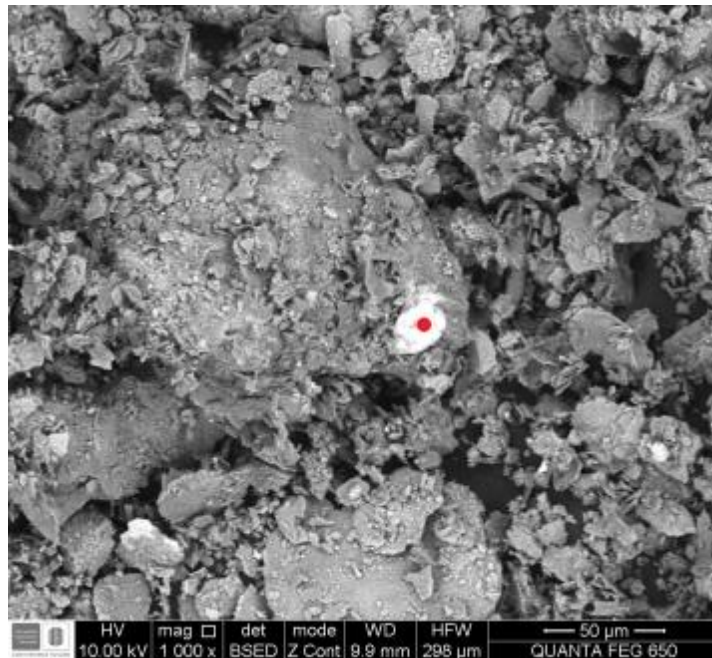
| Nombre | Materiales a reaccionar | | | Tiempo de curado en días |
|--------|-------------------------|-------------|---------------------|--------------------------|
| | Suelo (g) | Cemento (g) | Lutita compacta (g) | |
| ADI 1 | 300 | 0 | 1 | 7 |
| ADI 2 | 300 | 0.5 | 1 | 7 |
| ADI 3 | 300 | 1.0 | 0.5 | 7 |
| ADI 4 | 300 | 1.0 | 0 | 7 |
| ADI 5 | 300 | 0 | 1.0 | 14 |
| ADI 6 | 300 | 0.5 | 1.0 | 14 |
| ADI 7 | 300 | 1.0 | 0.5 | 14 |
| ADI 8 | 300 | 1.0 | 0 | 14 |

Fuente: Los autores.

Luego de cumplirse el tiempo de curado por 7 días de las 4 primeras aditivaciones, se procedió a realizar el ensayo de límite plástico, pero ningún material de los cuatro recipientes presentó plasticidad, por lo tanto no presentaban límite líquido, lo mismo ocurrió con los recipientes que tuvieron un curado de 14 días. Seguido de esto se eligieron dos aditivaciones para ser caracterizadas y analizadas, para este caso se escogió ADI 1 y ADI 4 para realizar un análisis comparativo entre el cemento y la lutita compacta.

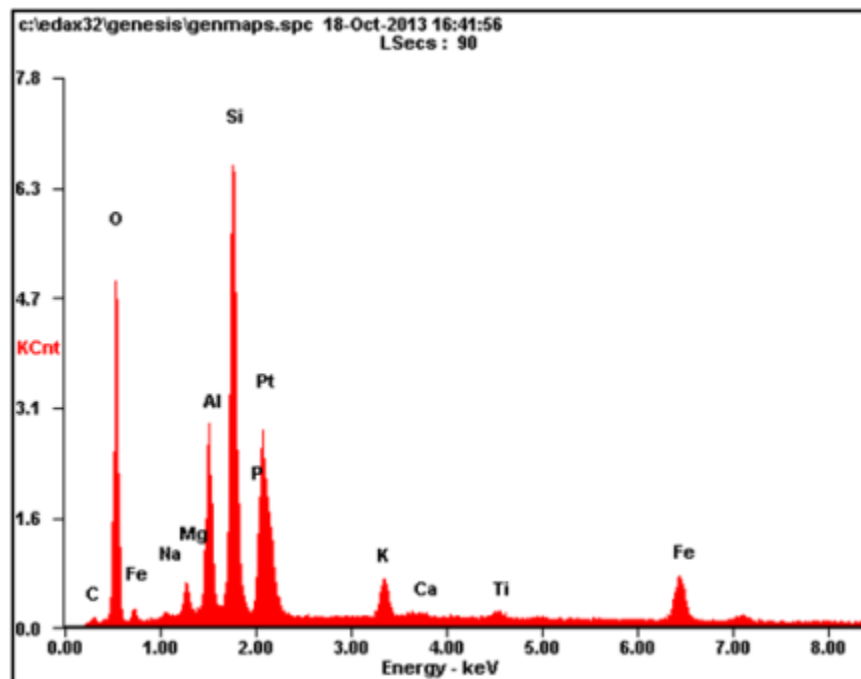
4.1.3.1 Microscopía electrónica de barrido. A continuación se muestran los respectivos espectrogramas, correspondientes al análisis SEM realizado a las a las aditivaciones ADI 1 y ADI 4, después de un tiempo de curado de 7 días; en la imagen se enfoca el fragmento sobre el que se realiza el análisis de composición que aparece en la tabla y espectrograma.

Figura 30. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 1.



Fuente: Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 31. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 1.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

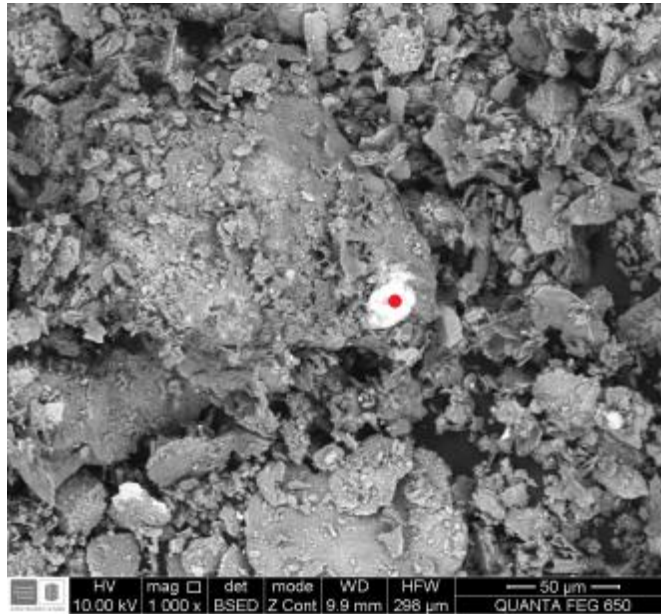
Tabla 15. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 1.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|-------------------|------------|
| CK | 01.47 | 03.46 |
| OK | 31.20 | 55.28 |
| NaK | 00.22 | 00.27 |
| MgK | 01.28 | 01.49 |
| AlK | 07.37 | 07.75 |
| SiK | 19.31 | 19.49 |
| PK | 02.07 | 01.90 |
| PtM | 25.36 | 03.68 |
| KK | 02.63 | 01.90 |
| CaK | 00.42 | 00.30 |
| TiK | 00.84 | 00.50 |
| FeK | 07.84 | 03.98 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

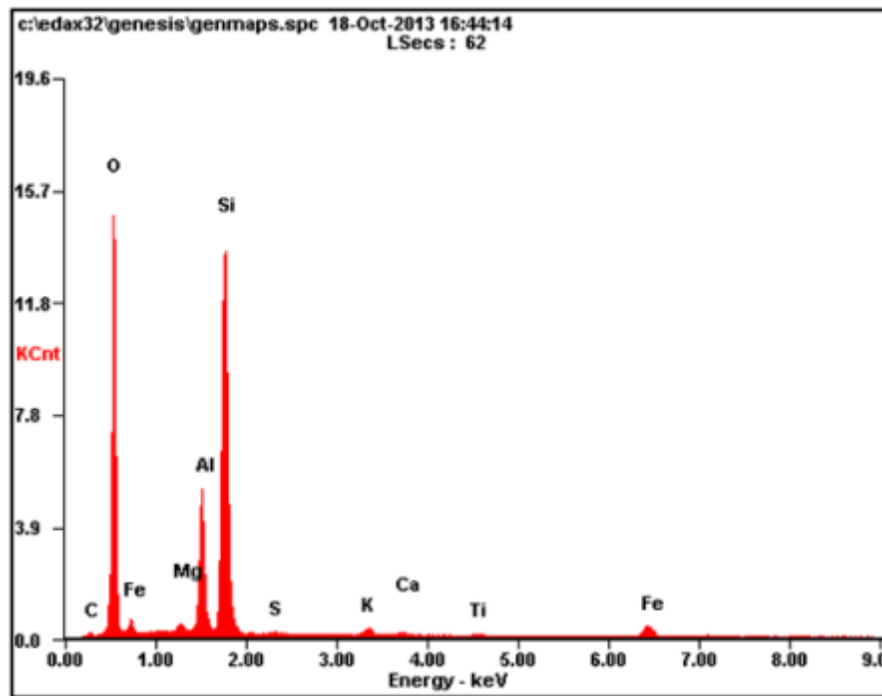
En el enfoque 1 del SEM realizado a la aditivación ADI 1, para la determinación de la composición química de la muestra, se dan altos porcentajes en peso de silicio y oxígeno, los porcentajes en peso más altos para los metales presentes en la muestra corresponden al aluminio y el platino. Para los metales alcalinos como sodio y potasio los porcentajes son bajos. Los valores menos representativos en porcentaje para los metales pertenecen al calcio, magnesio y titanio. Gases como el carbono aparece en concentraciones mínimas.

Figura 32. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 2.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatimar.

Figura 33. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 2.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatimar.

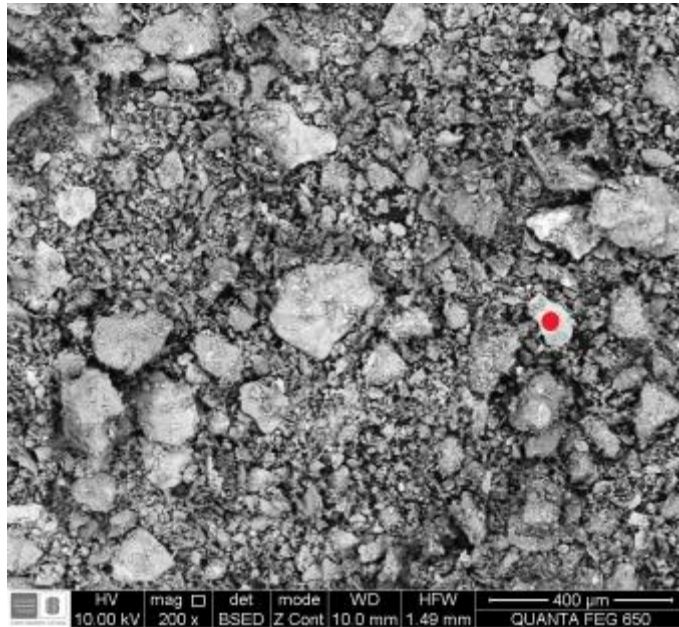
Tabla 16. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 2.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 01.36 | 02.29 |
| <i>OK</i> | 51.98 | 65.54 |
| <i>MgK</i> | 00.50 | 00.41 |
| <i>AlK</i> | 09.92 | 07.42 |
| <i>SiK</i> | 30.78 | 22.11 |
| <i>SK</i> | 00.23 | 00.14 |
| <i>KK</i> | 00.83 | 00.43 |
| <i>CaK</i> | 00.35 | 00.18 |
| <i>TiK</i> | 00.35 | 00.15 |
| <i>FeK</i> | 03.69 | 01.33 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

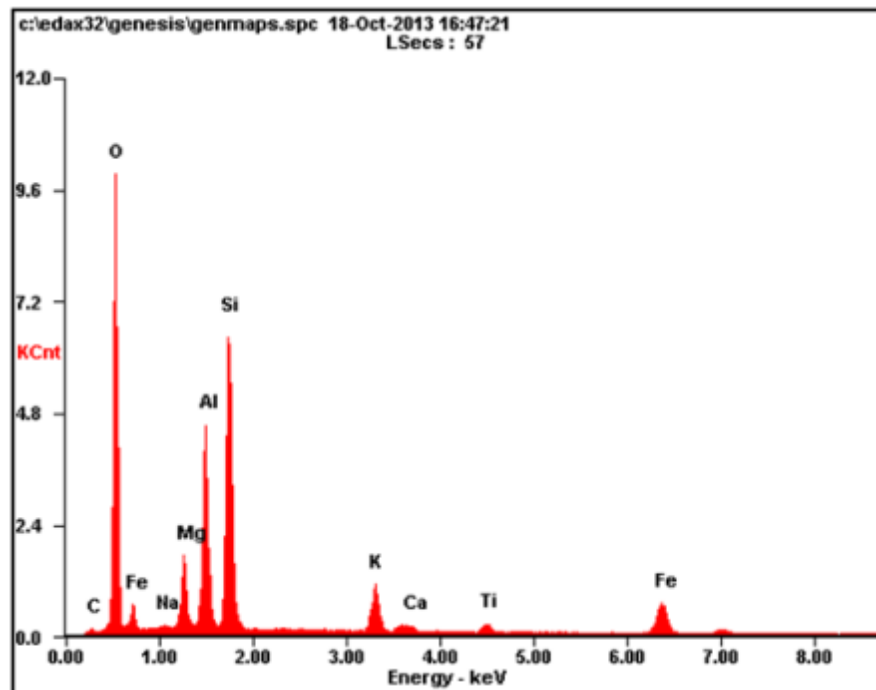
En el enfoque 2 del SEM realizado a la aditivación ADI 1, para la determinación de la composición química de la muestra, al igual que en el enfoque 1, se dan altos porcentajes en peso de silicio y oxígeno, porcentaje en peso para los metales presentes en la muestra corresponde al aluminio y a diferencia del enfoque anterior, el platino no registra. Los demás metales se dan en concentraciones mínimas y para gases como el carbono se mantiene su porcentaje en peso bajo.

Figura 34. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 3.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 35. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 3.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

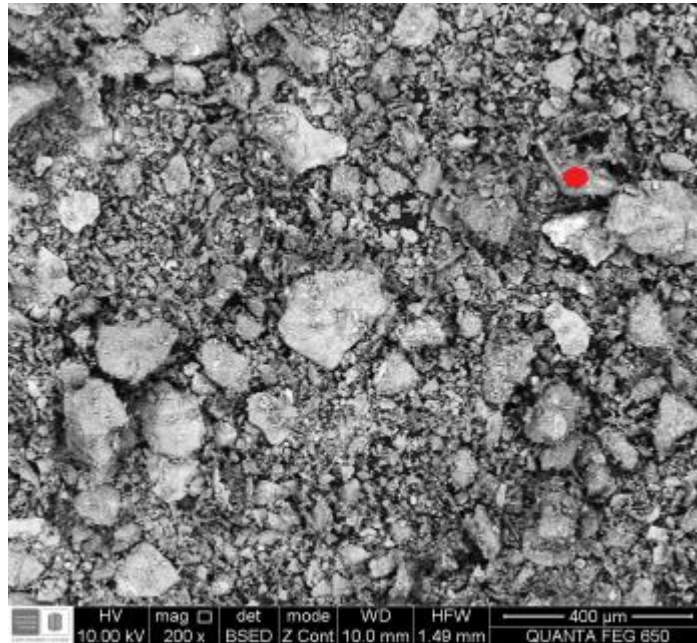
Tabla 17. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 3.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 01.35 | 02.38 |
| <i>OK</i> | 46.76 | 61.96 |
| <i>NaK</i> | 00.19 | 00.17 |
| <i>MgK</i> | 04.59 | 04.00 |
| <i>AlK</i> | 12.46 | 09.79 |
| <i>SiK</i> | 20.68 | 15.61 |
| <i>KK</i> | 03.94 | 02.13 |
| <i>CaK</i> | 00.50 | 00.26 |
| <i>TiK</i> | 01.07 | 00.47 |
| <i>FeK</i> | 08.47 | 03.21 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

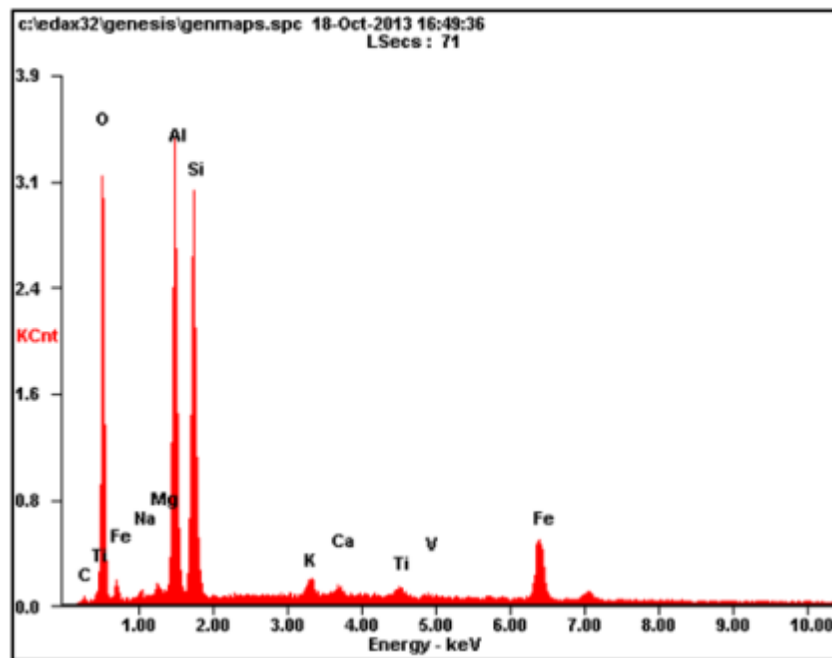
En el enfoque 3 del SEM realizado a la aditivación ADI 1, para la determinación de la composición química de la muestra, se observa cierta similitud con el enfoque # 2 ya que se mantienen los altos porcentajes en peso de silicio y oxígeno, el mayor porcentaje en peso para los metales presentes en la muestra sigue siendo el del aluminio y a diferencia del enfoque anterior el potasio se da en una mayor concentración. Los demás metales continúan registrando concentraciones mínimas. El carbono permanece con valores poco representativos.

Figura 36. Imagen SEM de ADI 1 enfoque 4.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 37. Espectrograma de la composición química de ADI 1 enfoque 4.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

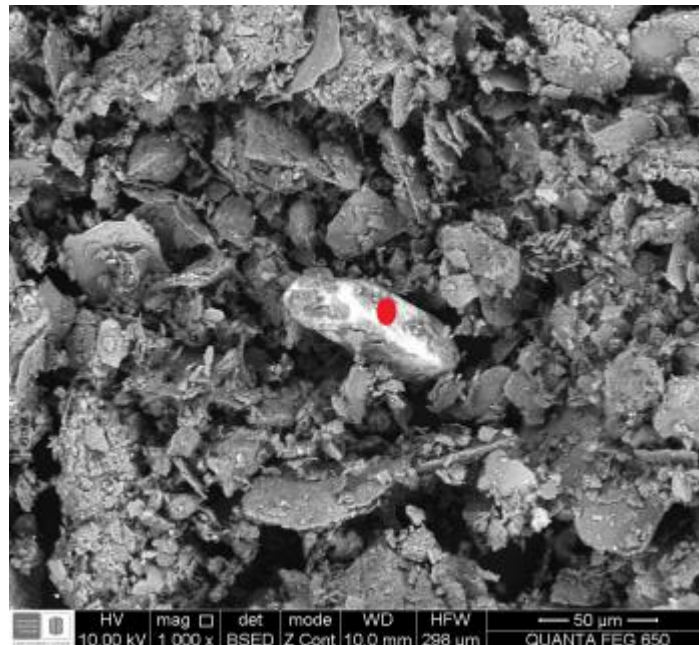
Tabla 18. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 1 enfoque 4.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 01.42 | 02.70 |
| <i>OK</i> | 36.90 | 52.68 |
| <i>NaK</i> | 00.46 | 00.46 |
| <i>MgK</i> | 00.77 | 00.72 |
| <i>AlK</i> | 20.42 | 17.29 |
| <i>SiK</i> | 22.97 | 18.68 |
| <i>KK</i> | 01.36 | 00.80 |
| <i>CaK</i> | 00.98 | 00.56 |
| <i>TiK</i> | 01.34 | 00.64 |
| <i>VK</i> | 00.37 | 00.17 |
| <i>FeK</i> | 13.00 | 05.32 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

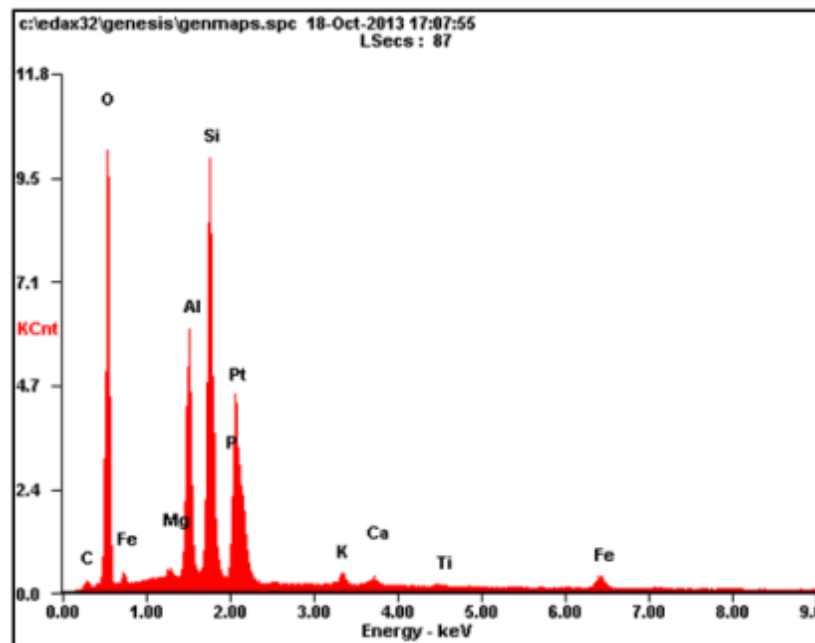
En el enfoque 4 del SEM realizado a la aditivación ADI 1, para la determinación de la composición química de la muestra, el aluminio incrementa en su porcentaje en peso con respecto a los datos de los 3 enfoques anteriores, los altos porcentajes en peso de silicio y oxígeno de la muestra se mantienen, el potasio baja de nuevo su concentración con respecto al enfoque anterior. Los demás metales continúan registrando concentraciones mínimas, a excepción del hierro que registra incremento del porcentaje en peso de la muestra. El carbono mantiene sus valores de concentración poco significativos en toda la muestra.

Figura 38. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 1.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 39. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 1.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

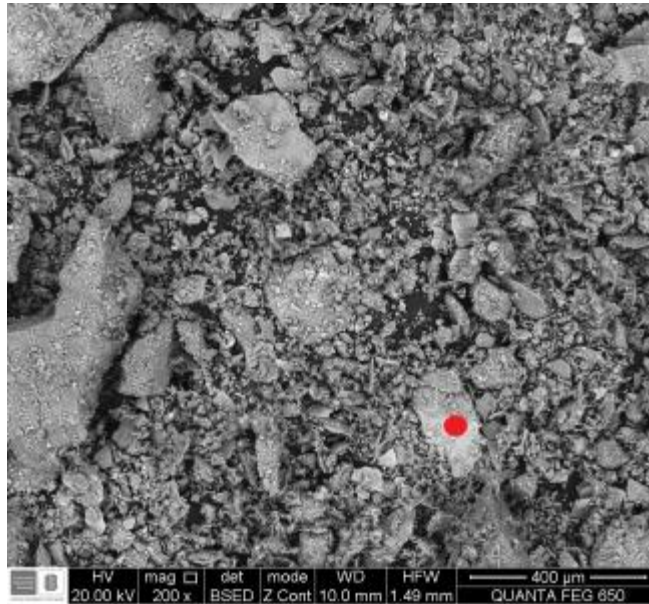
Tabla 19. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 1.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 01.98 | 04.28 |
| <i>OK</i> | 38.21 | 62.06 |
| <i>MgK</i> | 00.35 | 00.37 |
| <i>AlK</i> | 09.58 | 09.23 |
| <i>SiK</i> | 18.04 | 16.69 |
| <i>PK</i> | 02.28 | 01.91 |
| <i>PtM</i> | 25.78 | 03.43 |
| <i>KK</i> | 00.79 | 00.52 |
| <i>CaK</i> | 00.56 | 00.36 |
| <i>TiK</i> | 00.18 | 00.10 |
| <i>FeK</i> | 02.26 | 01.05 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

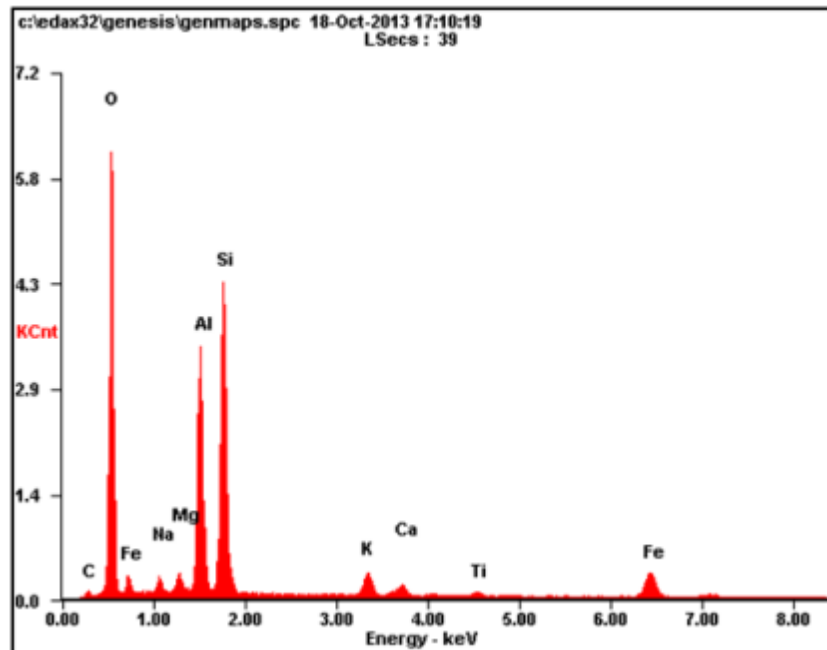
En el enfoque 1 del SEM realizado a la aditivación ADI 4 (1 gramo de cemento), para la determinación de la composición química de la muestra, se destaca el aluminio como el metal con los más altos porcentajes en peso; por su parte el silicio y oxígeno de la muestra registran los mayores porcentajes en peso entre todos los elementos presentes. Los demás metales como sodio, calcio, magnesio hierro y titanio muestran concentraciones mínimas, a excepción del platino deja ver un porcentaje en peso medio. El carbono y el fósforo aparecen en cantidades mínimas.

Figura 40. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 2.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 41. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 2.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

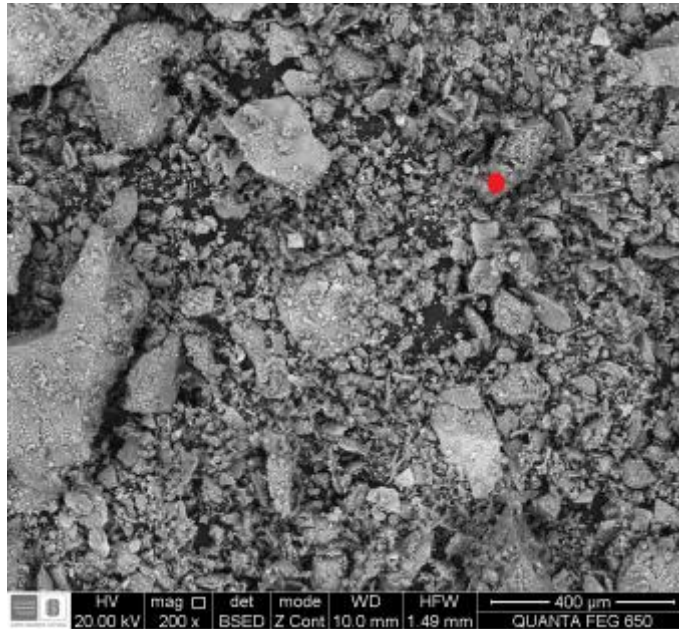
Tabla 20. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 2.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 02.04 | 03.52 |
| <i>OK</i> | 47.62 | 61.86 |
| <i>NaK</i> | 01.35 | 01.22 |
| <i>MgK</i> | 01.22 | 01.04 |
| <i>AlK</i> | 15.10 | 11.63 |
| <i>SiK</i> | 21.87 | 16.18 |
| <i>KK</i> | 02.10 | 01.12 |
| <i>CaK</i> | 01.05 | 00.54 |
| <i>TiK</i> | 00.53 | 00.23 |
| <i>FeK</i> | 07.13 | 02.65 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

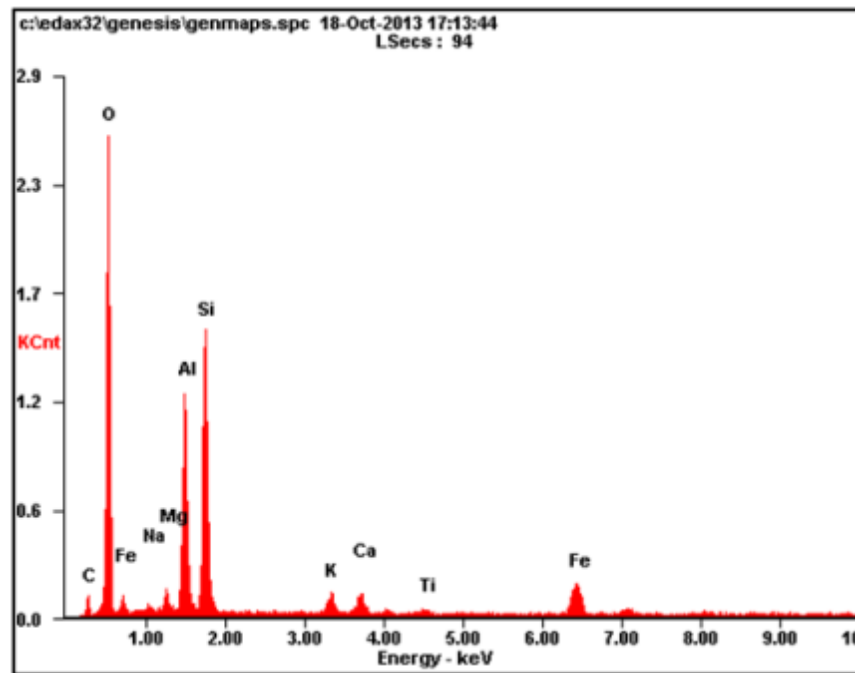
En el enfoque 2 del SEM realizado a la aditivación ADI 4 (1 gramo de cemento), para la determinación de la composición química de la muestra, el aluminio continúa como el metal con los más altos porcentajes en peso; así también el silicio y oxígeno de la muestra registran los mayores porcentajes en peso entre todos los elementos presentes al igual que para los datos del enfoque anterior. El sodio y el hierro tienen porcentajes en peso bajos. Los demás metales como calcio, magnesio y titanio muestran concentraciones menores que los demás elementos, al igual que el carbono.

Figura 42. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 3.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 43. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 3.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará

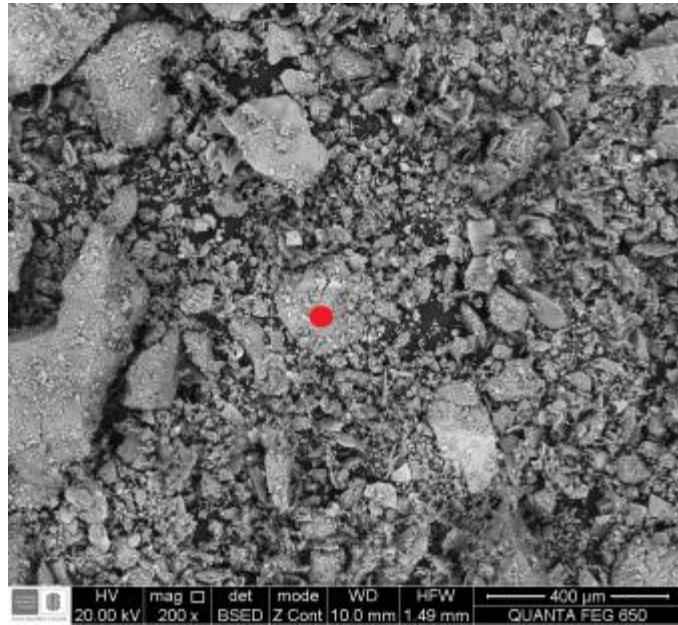
Tabla 21. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 3.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>CK</i> | 05.93 | 09.98 |
| <i>OK</i> | 47.60 | 60.16 |
| <i>NaK</i> | 00.46 | 00.40 |
| <i>MgK</i> | 01.18 | 00.98 |
| <i>AlK</i> | 12.63 | 09.47 |
| <i>SiK</i> | 18.91 | 13.62 |
| <i>KK</i> | 01.65 | 00.85 |
| <i>CaK</i> | 01.95 | 00.98 |
| <i>TiK</i> | 00.77 | 00.33 |
| <i>FeK</i> | 08.92 | 03.23 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará

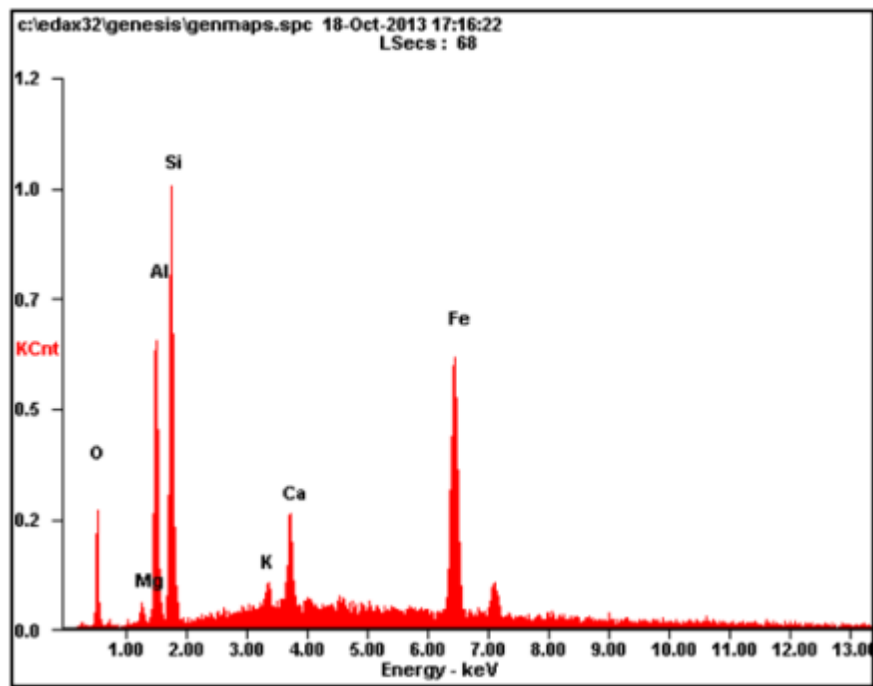
En el enfoque 3 del SEM realizado a la aditivación ADI 4 (1 gramo de cemento), para la determinación de la composición química de la muestra, el aluminio se mantiene como el metal con los más altos porcentajes en peso, como en los dos enfoques anteriores; al igual que el silicio y oxígeno de la muestra, cuyos porcentajes en peso son los mayores entre todos los elementos presentes. Los metales alcalinos, alcalinotérreos, y el titanio presentan bajas concentraciones. El carbono deja ver un pequeño incremento en la concentración comparado con los dos enfoques anteriores.

Figura 44. Imagen SEM de ADI 4 enfoque 4.



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Figura 45. Espectrograma de la composición química de ADI 4 enfoque 4



Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

Tabla 22. Porcentajes atómicos y de peso de cada elemento constituyente de la aditivación ADI 4 enfoque 4.

| <i>Element</i> | <i>Wt%</i> | <i>At%</i> |
|----------------|------------|------------|
| <i>OK</i> | 09.95 | 20.88 |
| <i>MgK</i> | 01.03 | 01.42 |
| <i>AlK</i> | 15.04 | 18.71 |
| <i>SiK</i> | 21.39 | 25.57 |
| <i>KK</i> | 01.54 | 01.33 |
| <i>CaK</i> | 05.95 | 04.99 |
| <i>FeK</i> | 45.09 | 27.11 |
| <i>Matrix</i> | Correction | ZAF |

Fuente: Laboratorio de SEM –UIS, Guatiguará.

En el enfoque 4 del SEM realizado a la aditivación ADI 4 (1 gramo de cemento), para la determinación de la composición química de la muestra, el hierro se ubica como el elemento con los más altos porcentajes en peso, el silicio presenta alta concentración y el oxígeno disminuye el porcentaje en comparación a los 3 enfoques anteriores. El aluminio y el calcio muestran concentraciones intermedias y el carbono no registra datos en este enfoque.

4.1.3.2 Difracción de rayos X. A continuación se muestran los respectivos, resultados correspondientes al análisis DRX realizado a las a las aditivaciones ADI 1 y ADI 4, después de un tiempo de curado de 7 días.

Tabla 23. Resultados de DRX para la aditivación ADI 1 (C7RC). N.C = No Cuantificable (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible refinar sus datos cristalográficos necesarios para su respectiva cuantificación). D.E = Desviación estándar.

| FASE | | NOMBRE | CUANTITATIVO (D.E) |
|------------------|--|--------------------|--------------------|
| Cristalinos | Si O_2 | Cuarzo | 19.5 % (0.1) |
| | $\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8)$ | Albita | 21.5 % (0.1) |
| | $\text{K (Si}_{0.75}\text{ Al}_{0.25})_4\text{ O}_8$ | Microclina | 11.7 % (0.1) |
| | $\text{Ca SO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{ O})_2$ | Yeso | N.C |
| | $\text{K Al}_2 (\text{ Si}_3\text{ Al}) \text{ O}_{10} (\text{ OH})_2$ | Moscovita | 13.4 % (0.2) |
| | $(\text{Mg}_{0.084} \text{ Ca}_{0.938}) (\text{ CO}_3)$ | Calcita Magnesiana | N.C |
| | $\text{Al}_2 (\text{ Si}_2\text{ O}_5) (\text{ OH})_4$ | Caolinita | 3.8 % (0.1) |
| | $\text{Mg}_3 (\text{ Si}_2\text{ O}_5) (\text{ OH})_4$ | Clinocrisotilo | <1 % |
| | $\text{Ca}_{0.2} (\text{ Al, Mg})_2 \text{ Si}_4 \text{ O}_{10} (\text{ OH})_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{ O}$ | Montmorillonita | N.C |
| Total Cristalino | | | 70.3 % |
| Amorfos y otros | | | 29.7 % |

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

Tabla 24. Resultados de DRX para la aditivación ADI 4 (C7RD). N.C = No cuantificable (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible refinar sus datos cristalográficos necesarios para su respectiva cuantificación). D.E = Desviación estándar.

| FASE | | NOMBRE | CUANTITATIVO (D.E) |
|------------------|--|-----------------|--------------------|
| Cristalinos | Si O_2 | Cuarzo | 13.0 % (0.1) |
| | $\text{Na (Al Si}_3\text{ O}_8)$ | Albita | 16.6 % (0.2) |
| | $\text{K (Si}_{0.75}\text{ Al}_{0.25})_4\text{ O}_8$ | Microclina | 10.3 % (0.2) |
| | $\text{Al (OH})_3$ | Gibbsita | N.C |
| | $\text{K Al}_2 (\text{ Si}_3\text{ Al}) \text{ O}_{10} (\text{ OH})_2$ | Moscovita | 5.6 % (0.1) |
| | Ca CO_3 | Calcita | N.C |
| | $\text{Al}_2 (\text{ Si}_2\text{ O}_5) (\text{ OH})_4$ | Caolinita | 27.1 % (0.3) |
| | $\text{Mg}_3 (\text{ Si}_2\text{ O}_5) (\text{ OH})_4$ | Clinocrisotilo | 2.4 % (0.1) |
| | $\text{Ca}_{0.2} (\text{ Al, Mg})_2 \text{ Si}_4 \text{ O}_{10} (\text{ OH})_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{ O}$ | Montmorillonita | N.C |
| Total Cristalino | | | 75.0 % |
| Amorfos y otros | | | 25.0 % |

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

Luego de revisar los datos obtenidos en el análisis de DRX aplicado a las muestras de suelo aditivadas ADI1 y ADI 4, se encuentran indicadores de cambio positivos con respecto al suelo original; En el suelo original se tenía un 38.1 % de material cristalino representado por cuarzo caolinita y moscovita, el 61,9 % restante pertenecía a material amorfo y otros. Comparando estos porcentajes composicionales del suelo sin aditivar con los de las aditivaciones ADI1 y ADI 4, se observa un cambio en los constituyentes del suelo ahora aditivado; la aparición de tectosilicatos como la microclina y la albita marcan la diferencia en la nueva composición del suelo. Estos minerales se caracterizan por su alta capacidad de resistencia a alteraciones, debido a su sistema cristalino donde todos los tetraedros de silicio están entrelazados entre sí en todas las direcciones del espacio. En la ADI 1, el 33,2 % pertenece microclina y albita, para la ADI 4, es el 26,9% de la composición total de la muestra. Así mismo, el porcentaje del material cristalino se incrementa a 70,3 % y 75 % en las ADI 1 y ADI 4 respectivamente. Estos cambios mineralógicos contribuyen a mejorar la consistencia del suelo y sus propiedades con respecto a las iniciales.

Al momento de ejecutar el ensayo de plasticidad para las muestras de suelo aditivadas con un tiempo de curado de 7 días, se observó claramente la pérdida de plasticidad, pues no era posible amasar el material aditivado para la elaboración de los cilindros que eran requisito para realización de la prueba. Para confirmar lo anterior, se intentó hacer el ensayo para las muestra aditivadas con curado de 14 días y como era de esperarse, tampoco presentaban plasticidad. Con estos resultados se vio claramente el cambio en el valor del índice de plasticidad, pasando de 4% en la muestra de suelo original a 0% en el suelo aditivado.

Una de las características de las arcillas, que contribuye a la disminución de la plasticidad de un suelo, es su capacidad de cambio. Esta propiedad se basa en la facilidad con la que la arcilla absorbe cationes y reemplaza iones monovalentes

(Na⁺, K⁺) por iones bivalentes (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺) o trivalentes (Al⁺⁺⁺, Fe⁺), este reemplazamiento ayuda a que se reduzca la alta concentración de cationes y la repulsión entre los mismos, permitiendo de manera simultánea que dichos cationes se aproximen a las cargas negativas ubicadas en la superficie de las arcillas y se creen nuevas fuerzas de atracción entre las partículas de la arcilla. Estas nuevas agrupaciones de partículas permiten la creación de flóculos o estructuras floculantes que dan mejor consistencia al material.

Por ejemplo para los enfoques 2 y 4 del SEM efectuado la ADI 1 (1 gramo de lutita y 0 cemento), se observa claramente la disminución de porcentajes en peso del potasio y el magnesio, manteniéndose la concentración de aluminio e incrementando los porcentajes de silicio y oxígeno; además, en el enfoque 1 se da la aparición del platino, un elemento polivalente. El incremento en las concentraciones y porcentajes en peso de los elementos formadores de sílice favorecen las condiciones de estabilidad para el suelo.

De manera similar se dan los cambios del suelo con respecto a la ADI 4 (0 gramos de Lutita y 1 gramo de cemento). En los datos registrados para los 4 enfoques de la ADI 4, se muestra la disminución en la concentración del potasio y magnesio, además, en el enfoque 1, se presenta el platino en un alto porcentaje en peso y como buenos indicadores de cambios positivos en el suelo, están el silicio y el oxígeno con porcentajes y concentraciones mucho más altas que en el suelo inicial.

5. CONCLUSIONES

- Por medio de ensayos como límites de Atterberg, se pudo encontrar el límite plástico y líquido del suelo arcilloso, con valores del 28 y 32 % respectivamente, el índice de plasticidad del suelo arcilloso inicial presentó una variación del 4 al 0 %; este resultado da lugar a la estabilidad del suelo.
- Se logró generar cambios en la mineralogía y composición química del suelo inicial mediante 8 aditivaciones, utilizando residuo de minería del yeso y cemento portland.
- Se determinó por medio de ensayos físicos mecánicos y químicos tales como; humedad natural, límite plástico, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido que la cantidad necesaria de residuo de minería para mejorar las propiedades naturales de un suelo arcilloso era de 1%.
- Mediante la Difracción de Rayos X realizada a las aditivaciones ADI 1 y ADI 4 se identificaron minerales tectosilicatos como la microclina y la albita, que no eran constituyentes del suelo arcilloso inicial, y contribuyen a la estabilidad del suelo por su alta resistencia a las alteraciones gracias a su sistema cristalino.
- El reemplazamiento de iones bivalentes como Ca^{++} , Mg^{++} , trivalentes como Al^{+++} , Fe^{+++} por iones monovalentes como Na^+ y K^+ , permite la aparición de nuevas fuerzas de atracción entre las partículas de arcilla, este fenómeno ayuda a mejorar la consistencia del suelo utilizado.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar una investigación en la cual se utilice el residuo de minería del yeso (Lutita Compacta), para estabilizar suelos con porcentajes de plasticidad variados 10, 15 y 20% con el fin de conocer los límites estabilizantes que dicho residuo; de tener éxito llevar a cabo pruebas en campo y promover esta técnica de estabilización de suelos como alternativa ambiental.
- Llevar a cabo una evaluación de la aplicación del residuo del yeso producto de la construcción; con el fin de tener más alternativas estabilizantes que contribuyan a disminuir el impacto ambiental que dichos residuos ocasionan.
- Se recomienda a la empresa divulgar esta información para que el sector vial se interese en utilizar estos residuos en estabilización de suelos. Esto no solo sería un aprovechamiento del residuo por parte de la empresa, también es un aporte a la mitigación del impacto ambiental generado por la acumulación del residuo

BIBLIOGRAFÍA

1. Aditivación de un suelo arcilloso con Cal. En línea < <http://pablomorenoaurioles.weebly.com/movimiento-de-tierras.html>>. [Citado el 12 de octubre de 2013].
2. Aditivación de un suelo arcilloso con Cemento. En línea < <http://pablomorenoaurioles.weebly.com/movimiento-de-tierras.html>>. [Citado el 12 de octubre de 2013].
3. Ameta N.K., Prohit D.G.M., Wayal A.S., Sandeep, D (2007). Economics of Stabilizing Bentonite Soil with Lime–Gypsum / Electronic Journal of Geotechnical Engineering; vol. 12. Bundle E.
4. Bell F.G., Maud R.R (1994). Dispersive Soils and Earth Dams with Some Experiences from South Africa / Bulletin of the Association of Engineering Geologists 31 (4); 433–446.
5. Bromwell, Carrier, (1988). Stabilization of Phosphatic Clay with Lime Columns / Grant Sponsored by the Florida Institute of Phosphate Research, Bartow–Florida; 102 p.
6. Cerulla J, Parcerisa (1997-9 Extracción, Explotación, Minería y Proceso de Tratamiento del Yeso Iberyeso / Grupo BPB, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio; Dossier.

7. Clasificación de las rocas sedimentarias según el tamaño de grano en mm. En línea < <http://geologiavenezolana.blogspot.com/2012/04/identificacion-y-clasificacion-de-rocas.html>>. [Citado el 12 de octubre de 2013].
8. Duque G. Manual de geología para ingenieros / Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Cap. 9. Pg. 182-189.
9. Eren S, M. Filiz, (2009). Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material / Süleyman Demirel University, Technical Education Faculty, Construction Education Department, Isparta, Turkey, Construction and Building Materials 23; 2473–2480.
10. Fragmentación de una voladura convencional. En línea < http://www.convencionminera.com/perumin_cms/upload/archivos/TT-080%20Final.pdf >. [Citado 13 de octubre de 2013].
11. Gueddouda M.K, I. Goual, M. Lamara, A. Smaida, B. Mekarta (2011). Chemical Stabilization of Expansive Clays from Algeria; Global Journal of researches in engineering / J General Engineering; Volume 11 Issue 5 Version 1.0.
12. López V, Ascanio G, Guerrero V (2003). Rocas Industriales de Venezuela / Fundacite Aragua.

13. Lucuara K. 2010. *Determinación de humedad natural de suelos finos sin utilizar reductores de calor mediante el horno microondas*. Universidad de la Sallé Facultad de Ingeniería programa de ingeniería civil Bogotá D.C: Tesis de grado 2010.
14. Malhotra M, Naval S (2009). Stabilization of Expansive Soils Using Low Cost Materials / International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT); Volume 2, Issue 11.
15. Melgarejo J, Proenza J, Galí S, Llovet X (2010). Técnicas de Caracterización Mineral y su Aplicación en Exploración y Explotación minera; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana; Volumen 62, núm. 1, p. 1-23.
16. Mina de glauberita y yeso a cielo abierto en Colmenar de Oreja. En línea < <http://www.espormadrid.es/2010/08/la-mina-de-glauberita-y-yeso-en.html> >. [Citado el 13 de octubre de 2013].
17. Nelson J, Miller D., (1992). Expansive soils-problems and practice in foundation and pavement engineering / International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol. 17, 745-746.
18. Planta de transporte y triturado de roca. En línea < <http://www.vipeakgroup.com/Crusher.html?gclid=COyxgP2aqboCFQto7AodwFkAhQ> >. [Citado 13 de octubre de 2013].

- 19.** Shantharam G (2005). Field and Experimental Studies to Assess the Performance of Stabilized Expansive clay / Master of Science in civil engineering; The University of Texas at Arlington.

- 20.** Yilmaz I, Civelekoglu B (2009). Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils, Cumhuriyet / University Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Sivas, Turkey, Applied Clay Science 44 166–172.

