

## CARACTERIZACION MINERALOGICA DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON FINES DE ESTABILIZACION

### MINERALOGICAL CHARACTERIZATION EXPANSIVE CLAY STABILIZATION PURPOSES

Ing. Leidy Johana Quintero Lemus<sup>a</sup>, Msc. Romel Jesús Gallardo Amaya<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio Ambiente GIGMA. Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Norte de Santander, Colombia, [ljquinterole@ufpso.edu.co](mailto:ljquinterole@ufpso.edu.co)

<sup>b</sup> Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio Ambiente GIGMA. Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Norte de Santander, Colombia, [rjgallardo@ufpso.edu.co](mailto:rjgallardo@ufpso.edu.co)

**Fecha de recepción:** 11-10-2015

**Fecha de aprobación:** 30-11-2015

**Resumen:** La investigación realizada muestra los resultados de ejercicios experimentales mineralógicos llevados a cabo para caracterizar las arcillas expansivas y evaluar su predominio de minerales. El programa de laboratorio consistió en pruebas para determinar la composición mineralógica mediante ensayos de Difracción de Rayos x (DRX por su sigla en inglés), Análisis Térmico Diferencial y Microscopia Electrónica de Barrido. El material objeto de análisis correspondió a sedimentos arcillosos abigarrados de color primariamente rojizo, microlaminados, con presencia de lentes de yeso y trazas carbonáceas, pertenecientes a la Formación León (Tol), un complejo terreo terciario de edad Oligoceno. Superficialmente tales materiales revelan distinto grado de erosionabilidad y meteorización y son esencialmente suelos ácidos, susceptibles a experimentar cambios volumétricos por modificaciones en su contenido de humedad, aflorantes en un medio climático de bosque muy seco tropical. Los ensayos destacan que el material ensayado presenta características de alta plasticidad, alta compresibilidad y media a alta expansividad, con minerales de arcilla preferencialmente illíticas y caoliniticas y comportamiento esfuerzo deformación dúctil.

**Palabras clave:** Arcillas expansivas, mineralogía, geología, difracción de rayos x, análisis termo-diferencial, microscopia electrónica de barrido.

**Abstract:** The research shows results from experimental mineralogical exercises carried out to characterize expansive clay material and to evaluate its mineral predominance. The laboratory program consists of tests to determine the mineralogical composition by means of X-ray diffraction (XRD for its acronym in English), differential thermal analysis and scanning electron microscopy analysis. The material in this research corresponded to variegated clay sediments, primarily reddish, microlaminated, with the presence of gypsum lenses and carbonaceous traces, belonging to the Leon Formation (Tol), a Tertiary soil complex from the Oligocene period. Superficially, such materials reveal a different degree of erodibility and are essentially acid soils, susceptible to suffer volume changes due to modifications in its moisture content, outcropping in a very dry tropical forest climate environment. The results emphasize that the tested material shows high plasticity, high compressibility and medium to high expansiveness characteristics, with preferentially illitic and kaolinitic clay material, and ductile stress-deformation behavior.

**Keywords:** expansive clays, mineralogy, geology, X-ray diffraction, thermodifferential analysis, Scanning electron microscopy

## 1. INTRODUCCIÓN

Los suelos expansivos suelen producir daños severos a distintos tipos de estructuras que se encuentren sobre ellos. La causa de la expansión del suelo se entiende desde diversas hipótesis pero aun hoy no se comprende íntegramente este fenómeno que a pesar de no configurar un riesgo de vida preocupante como los terremotos, huracanes o inundaciones, si son causantes de grandes costos económicos [Jones y Jones, 1987]. Por lo tanto se hace necesario realizar caracterizaciones muy precisas cuando de suelos expansivos se trate para identificar el potencial de expansión y determinar posibles procedimientos y alternativas de estabilización del suelo.

Se define un suelo expansivo, como aquel que presenta cambios apreciables de volumen (expansión o contracción), debido al aumento o disminución de humedad. La causa de estos cambios guarda estrecha relación con características físico químicas del suelo, principalmente al gran contenido de finos compuestos por diversos materiales entre los que debemos destacar la

montmorillonita (Barreto et al; 1981). La expansión es atribuible a un incremento y disminución de la tensión capilar, que se genera en las zonas límites entre el agua de los vacíos y el aire.

Es decir, cuando un suelo expansivo pierde agua se produce un incremento en la tensión capilar al tratar de absorber el agua necesaria para el equilibrio, trayendo como consecuencia un encogimiento; de manera similar cuando un suelo se haya comprimido y en condición de absorber agua, se produce un relajamiento de la tensión capilar al ganar el agua necesaria para el punto de equilibrio; lo cual produce un hinchamiento. Otra hipótesis referente a la causa de los cambios de volumen, atribuye la expansión al ajuste que tiene lugar entre el agua de poros y la estructura de la montmorillonita, gracias al cambio en sus energías estructurales. (Low; 1972).

A nivel mundial los suelos expansivos son causantes de problemas en diferentes tipos de infraestructura (Chen, 1975). Por ejemplo en la ciudad de Cúcuta, se han identificado daños producidos principalmente por

levantamientos o asentamientos diferenciales, inducidos por la interacción suelo-estructura al cambiar las condiciones de humedad del suelo de apoyo (Flórez et al, 2008), debido al grado de potencial de expansión. La figura 1, muestra algunos daños que se producen en las estructuras debido al fenómeno de expansión del suelo.



Figura 1. Daños producidos por expansión del suelo

Fuente: Elaboración propia.

## 2. METODOLOGÍA

Se trata de una investigación de tipo descriptivo y experimental, que tomó como población de estudio la formación arcillosa León que aflora en el área metropolitana de San José de Cúcuta.

La figura 2 muestra las diferentes formaciones geológicas presentes en la ciudad de San José de Cúcuta.

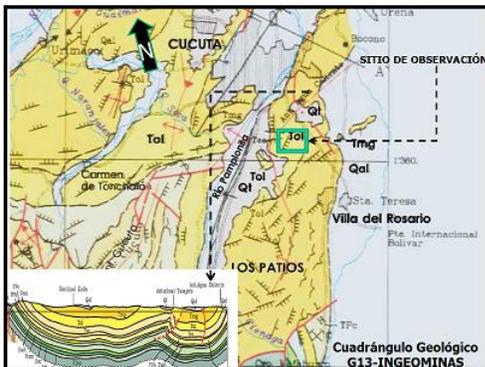


Figura 2. Distribución de las formaciones geológicas

Fuente: Ingeominas, 2008

Ensayos de caracterización física y técnicas como Microscopia Electrónica de Barrido, Análisis Termodiferencial y Difracción de Rayos x, fueron usados para la clasificación e identificación de minerales del suelo en estudio.

## Geología General

El macizo rocoso que alberga la presencia de arcillas expansivas es la formación León. Los sedimentos se registran en estructura microestratificada, y tienen, en líneas generales subparalelismo con la pendiente topográfica, lo cual sugiere desfavorabilidad en materia de estabilidad en los cortes transversales hechos en el terreno.

Las arcillolitas de la Formación León, registran, meteorización severa y rasgos erosivos esencialmente hídricos, con geometría de cárcava. Estos estratos arcillosos microlaminados tienen presencia de lentes de yeso, abigarradas untuosas en estado húmedo y friables en estado seco; de media a alta plasticidad y con expansividad media a alta.

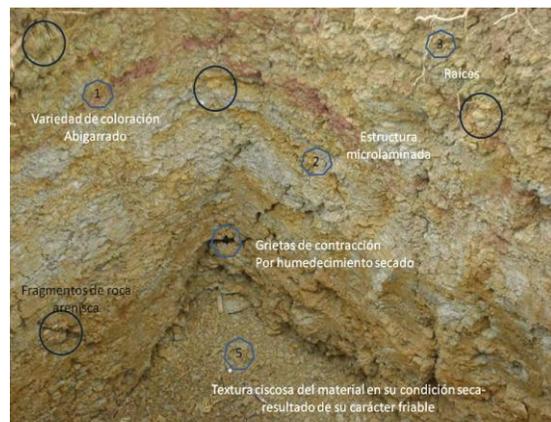


Figura 3. Perfil tipo de las arcillas expansivas de la formación León.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra	w(%)	Atterberg (%)			% Pasa 200	Suelo USC
		LL	LP	IP		
A1-M1	5.26	62.50	23.39	39.01	94.51	CH
A2-M1	4.86	64.40	24.16	40.24	97.73	CH
A2-M2	5.28	65.60	25.44	40.16	95.28	CH
A3-M1	9.58	67.50	22.45	45.05	92.06	CH
A3-M2	17.07	54.70	21.97	37.73	96.37	CH
A4-M1	3.82	60.64	39.23	40.07	94.77	CH
A4-M2	5.15	56.58	35.89	37.19	94.22	CH
A4-M3	5.44	58.92	42.65	40.67	93.61	CH
A4-M4	5.55	57.26	39.53	38.29	94.76	CH

**Tabla 1.** Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas de clasificación.

Fuente: Elaboración propia

La figura 3 ilustra el geomaterial analizado, típico en el sector de los sedimentos de la Formación León. El perfil litológico expuesto, muestra microlaminación; se aprecian fragmentos subangulares de roca arenisca, producto de antiguos movimientos coluviales de la masa térrea en el sector explorado; se visualizan raíces y grietas de contracción por desecación, con lineamiento vertical preferencial, interviniendo la totalidad de la longitud del apique excavado.

El material expuesto presentó, al momento de su observación, consistencia semisólida

## 2.2 Características Físicas del Suelo

La discriminación entre los distintos tipos de suelos, a cada uno de los cuales se le da un nombre descriptivo o un símbolo, se basa en unas pocas propiedades del material que son llamadas propiedades índice. (Márquez, 1988); las pruebas para determinar esas propiedades se llaman ensayos de clasificación los cuales son granulometría, Limite Líquido (LL), Limite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP)

Para la toma de muestra se utiliza la simbología de A1M1, la cual indica el número de apique y muestras obtenidas. En la tabla 1 se muestra los resultados obtenidos, donde LL indica el Limite Líquido, LP Limite Plástico, IP Índice de Plasticidad

## 2.3 Caracterización Mineralógica del Suelo

El objetivo de estas pruebas era la de obtener una descripción de los minerales existentes en las muestras estudiadas, los ensayos de los análisis especiales [Difracción de Rayos X, Análisis Termogravimétrico y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)] le fueron practicados a las muestras. Tales pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Geología, Geofísica y Geoquímica Ltda, GMAS, de la ciudad de Bogotá.

### 2.3.1 Difracción de Rayos x (DRX).

Tres muestras se sometieron a análisis por medio de difracción de rayos x en la rutina

de muestras orientada, impregnación con Etilen Glicol y calcinación de muestra a 500°C (Código MS-1b) con el fin de identificar minerales en secciones orientadas con fracción menor a 2µm.

Para la preparación de las muestras se procedió a realizar la siguiente rutina: pulverización de la muestra (mortero de ágata); dispersión de 3gr de muestra pulverizada en 50ml de agua destilada; agitación durante 20 minutos; decantación durante 15 minutos; pipeteado del primer cm de la suspensión y vertimiento en portamuestras de vidrio; secado durante 5 horas aproximadamente a 40°C.

Luego del barrido de la muestra orientada se realiza la impregnación con Etilen Glicol con el fin de determinar la presencia de minerales expansivos, esta se realiza en un desecador con Etilen Glicol al vacío durante 4 horas y se realiza nuevamente otra corrida en el equipo bajo las condiciones de medida para la muestra orientada natural.

Después de haberse realizado el barrido de la muestra impregnada con Etilen Glicol, se calienta la muestra a 500°C durante 4 horas con el fin de determinar Cloritas y Caolinitas. La corrida en el equipo se realiza bajo las condiciones de medida para la muestra orientada.

### 2.3.2 Análisis Térmico diferencial

El análisis térmico diferencial (DTA por su sigla en inglés) es una técnica que registra la diferencia en temperatura entre una sustancia y un mineral de referencia, estos dos especímenes están sujetos a unos mismos regímenes de temperatura en un ambiente controlado por una tasa de calentamiento y enfriamiento. El registro obtenido es denominado análisis térmico diferencial (DTA) mostrado en una curva que provee la sustancia en un rango de temperatura usado, se muestra una serie de

picos, la posición de cada uno de estos picos responde a la composición química y la estructura cristalina de la sustancia en un área que relaciona y envuelve la reacción ocuriente.

### 2.3.3 Análisis por microscopía electrónica de barrido.

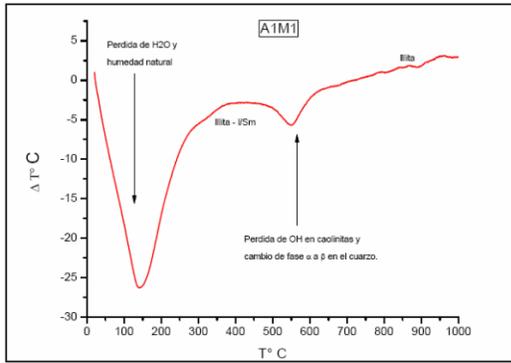
Para el análisis de las muestras en el microscopio electrónico de barrido (SEM por su sigla en inglés), estas se cortaron en fragmentos de 1cm<sup>2</sup> y posteriormente se les realizó un recubrimiento con oro. El oro es considerado un buen conductor lo que permite que no exista carga electrónica en la muestra y se pueda observar con buena resolución la superficie bajo el microscopio.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Caracterización Física

Como parte de la clasificación ingenieril de las muestras referenciadas en el Cuadro 1 listadas en la tabla 1 se llevaron a cabo pruebas de plasticidad basado en los límites de Atterberg. Estos límites se evaluaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 4318 (ASRTM, 2005b). El Cuadro 1 presenta los valores encontrados de los límites. Estos se muestran en forma gráfica en la figura 4 que muestra la carta de plasticidad propuesta por Atterberg.

En la figura 4 se observa que la mayoría de las muestras se ubican en la zona de la carta por encima de la línea A correspondiendo a suelos CH, los cuales presentan alta plasticidad. Debido a que los resultados quedan próximos a la línea A por encima, sugiere presencia de minerales de arcilla caoliniticas e illiticas



**Figura 4.** Ubicación de los límites de plasticidad en la carta de plasticidad de Atterberg

Fuente: Modificado por autores.

### 3.2 Caracterización Mineralógica del Suelo

#### 3.2.1 Difracción de Rayos x (DRX)

Según los datos obtenidos y registrados en la tabla 2 se puede apreciar que el mineral más abundante en las muestras de estudio es la caolinita; esto es debido al proceso de meteorización que ha tenido el suelo en la zona, la caolinita no absorbe agua en su estructura molecular como lo hacen las montmorillonitas, por lo tanto, se puede decir que el proceso de expansión que presenta el tipo de suelo usado para el estudio es debido a la combinación entre la caolinita y la illita, dado que, esta última se encuentra estructurada análogamente como las montmorillonitas.

#### 3.2.2 Análisis Termo Diferencial

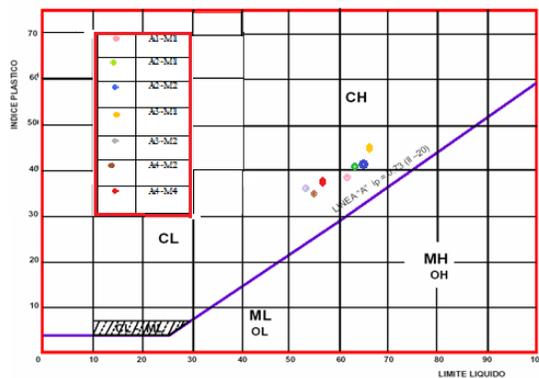
La figura 5 muestra una curva típica de las muestras de los suelos analizados, la cual presenta principalmente dos picos endotérmicos (picos hacia abajo). El primer pico endotérmico que ocurre a temperaturas bajas entre 100 y 200°C y es debido a la pérdida de agua adsorbida. Este pico con

este rango de temperaturas, ocurre mayormente en minerales 2:1 como vermiculita, illita, esmectitas. Aunque también puede ocurrir en la haloisita y en minerales amorfos como el alofan. El segundo pico endotérmico ocurre entre 500 y 600°C y es característico de la caolinita debido a un efecto de deshidroxilación, el cual consiste en un proceso de descomposición de una sustancia en radicales H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> para formar agua.

**Tabla 2.** Minerales encontrados en las muestras analizadas por DRX en la rutina de arcillas.

Muestra	Caolinita	Illita	Esmectita	II/Esmec	Cuarzo	Clorita
A1 M1	++ +	+	ND	+	++	ND
A2 M2	++ +	+	-	+	++	ND
R1	++ +	+	-	+	+	ND

Fuente: Laboratorio gmas.



**Figura 5.** Curva obtenida del suelo analizado en el análisis termodiferencial

Fuente: Reporte de Laboratorio gmas.

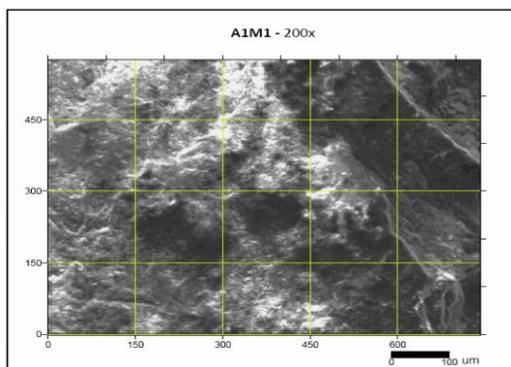
#### 3.2.3 Microscopia Electrónica de Barrido

El análisis de las muestras se realizó a diferentes aumentos, desde 35X hasta

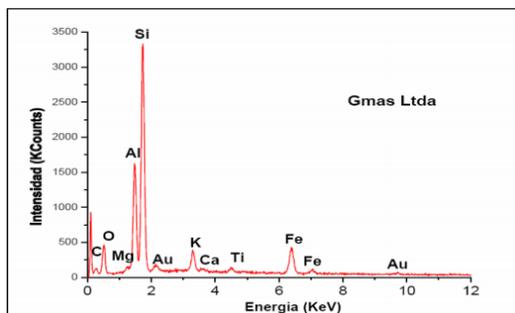
3500X, según lo permitieran las propiedades físicas de la muestra y la delesnabilidad, ocasionan pérdidas en la superficie de la misma dejando zonas no metalizadas que generan carga de superficie e inferencia a aumentos superiores a 8000X.

Mineralógicamente se determinó la presencia de minerales de arcilla identificados en los espectros de DRX principalmente caolinitas; estructuralmente las muestras presentan una orientación preferencial tipo foliación debido al importante contenido de minerales de arcilla, las estructuras pedogenéticas se hacen más evidentes a aumentos del orden de 2000X donde se identifica microporosidades por efectos radiculares y a su vez una fuerte presencia de siderita. Ver Figuras 6.a y 6.b

Los análisis químicos elementales realizados a diferentes aumentos indican un alto contenido de hierro para el suelo analizado.



**Figura 6.a** Microscopia Electrónica de Barrido para suelo analizado



**Figura 6b** Microscopia Electrónica de Barrido para el suelo analizado

#### 4. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN APLICABLES EN ARCILLAS EXPANSIVAS

Ante la presencia de un suelo expansivo, los dos grandes campos de acción sería. Actuar en el sentido de reducir o eliminar la expansión del suelo y/o actuar sobre la estructura y a través de la selección de un diseño de cimentación apropiado. (Patrone et al, 2015)

Según el capítulo H.9.1.7 de la NSR-10, establece que el suelo expansivo puede alterarse por los siguientes métodos. “Reemplazo (consiste en la excavación y el reemplazo de la capa expansiva, cuando su espesor y profundidad no lo hacen prohibitivamente costoso), Tratamiento con cal (La mezcla superficial de cal con el suelo potencialmente expansivo o su inyección a presión es benéfica, según el estado del suelo y el método de aplicación), Pre-humedecimiento (Supone la expansión previa a la colocación de la estructura y el mantenimiento de esa humedad bajo una placa o un recubrimiento impermeable)”

Los investigadores del Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental GIGA-UFPS, desarrollaron una investigación complementaria a este estudio que consistía en estabilizar las arcillas expansivas de la Formación León de la Ciudad de San José de Cúcuta usando cenizas volantes, en el cual se tomó como muestra de estudio las mismas arcillas que fueron base para la caracterización mineralógica.

“Las cenizas son granos muy finos, oscilando entre 0.5 y 300  $\mu\text{m}$ , a veces hasta 500  $\mu\text{m}$ , formados por silicatos, óxido de

aluminio, óxidos variados y cal libre. Esta última le confiere propiedades puzolánicas, reduciendo así, el índice de expansión del suelo” (Flórez et al, 2008)

Según Flórez et al 2008, Se realizaron mezclas en volumen al 20, 25 y 30%. Se agregaron 50 a 100 ml de agua destilada hasta lograr mezcla completa de los dos materiales (ceniza volante y arcilla en estudio); se almacenaron en bolsas plásticas selladas y se mantuvieron a temperatura ambiente. En el Cuadro 3 la tabla 3 se muestran los resultados al pasar 3.5 días de curado.

**Tabla 3.** Dosificación de Mezcla suelo-cenizas y límites de plasticidad..

MEZCLA	0%	20% VO L.	25% VO L.	30% VO L.
<b>MUESTRA</b>				
<b>A1-M1</b>				
LL	62.50	55	53.40	52.60
LP	23.39	21.46	21.75	26.29
IP	39.01	33.54	31.65	26.31
LC	12.66	14.46	13.87	15.09
% Re. del IP	-----	14.02	18.87	32.56
<b>A2-M1</b>				
LL	64.40	49.00	48.00	48.10
LP	24.1	17.6	17.8	24.1

	6	0	5	6
IP	40.24	31.40	30.15	23.94
LC	11.40	12.31	17.85	11.98
% Re. del IP	-----	21.97	25.07	40.51
<b>A2-M2</b>				
LL	65.60	58.10	59.00	55.50
LP	25.44	24.19	24.93	26.87
IP	40.16	33.91	34.07	28.63
LC	12.09	16.25	18.45	15.78
% Re. del IP	-----	15.56	15.16	28.71
<b>A3-M1</b>				
LL	67.50	54.70	58.00	54.40
LP	22.45	21.81	24.37	22.10
IP	45.05	32.89	33.63	32.30
LC	12.55	20.17	16.68	18.29
% Re. del IP	-----	26.99	25.35	28.30
<b>A3-M2</b>				
LL	59.70	60.60	51.70	52.20

LP	21.9 7	24.0 6	22.4 1	23.3 9
IP	37.7 3	36.5 4	29.2 9	28.8 1
LC	15.8 7	14.4 8	15.8 4	14.7 2
% Re. del IP	— —	3.15	22.3 7	23.6 4

Fuente. Flórez et al, 2008.

En la tabla 3 se nota la disminución de los límites al aumento de la proporción de cenizas agregadas, esto en la mayoría de los casos. La mezcla hecha al 30% en volumen provocó la mayor disminución del índice de plasticidad y del límite líquido.

El efecto de la adición de las cenizas sobre el suelo arcilloso, en un tiempo corto de curado, es beneficioso, ya que reduce en un 18,85% el límite líquido y el índice de plasticidad en un 32,55%, así como la superficie específica se redujo en un 23,86% (Flórez et al, 2008), aumentando así la estabilidad del suelo para los fines requeridos.

#### 4. CONCLUSIONES

Los suelos arcillosos estudiados presentaron límites líquidos mayores de 50% e índice de plasticidad mayor de 35%, lo cual nos indica que es un suelo CH según la USC.

Basados en los resultados del límite líquido e índice de plasticidad y usando las tablas de Holtz y Gibbs podemos identificar el grado de expansión del suelo, en este caso podemos decir que es un suelo altamente expansivo

La importancia de la estructura del suelo desempeña un papel importante para mejor

compresión de los fenómenos asociados a la expansión y al colapso. En el caso de las arcillas expansivas la microestructura y su estado de esfuerzo son aspectos fundamentales para el análisis de su comportamiento.

Para la adición de las cenizas al suelo como técnica de estabilización se debe estudiar el tipo de mineral presente en el suelo ya que está en presencia de taumasita y/o etringita puede producir un retardo en el proceso de estabilización.

Se realizó ensayos mineralógicos arrojando resultados cualitativos sobre la composición mineralógica del suelo en estudio, el cual posee el mineral arcilloso denominado Caolinita con presencia de Illita, el cual este último le da la propiedad al suelo de manifestar cambios de volumen al ser sometido a cambios de humedad-secado.

#### 5. FINANCIACIÓN

Los recursos para el desarrollo de este proyecto de investigación fue dado por la Universidad Francisco de Paula Santander sede Central Cúcuta.

#### 6. AGRADECIMIENTOS

Se extiende cordial agradecimientos al valioso apoyo dado por el Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio Ambiente GIGA de la Universidad Francisco de Paula Santander en especial al Ing Carlos Humberto Flórez Góngora por su invaluable colaboración.

De igual manera a los Ingenieros Álvaro O. Pedroza Rojas y Ricardo Zarate Caballero; a los laboratoristas de la UFPS Oscar Dallos e Isidoro Rangel, por su asesoría para el buen desarrollo de la investigación.

de San José de Cúcuta (Caso de estudio: Colinas de Vista Hermosa), Universidad Francisco de Paula Santander, 2010

## 7. BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. Bogotá: AIS, 2010. 1625 p. (Título H NSR-10).

BARRETO. C. Zaida, PEREZ C. Gabriel; Estudio y Tratamiento de Estabilización de las Arcillas Expansivas de la Zona Norte de Cúcuta; Universidad Francisco de Paula Santander; 1981

CHEN, F.N; Foundations on Expansive Soils, Developments in Geotechnical Engineering 12, Elsevier Scientific, New York; 1975.

FLOREZ G.C, ZARATE R, CAICEDO Z, CONTRERAS B. Estabilización Química de Suelos Expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) Usando Cenizas Volantes, Revista Respuestas, ISSN 0122-820X, 2008

GUADALUPE T. Y; Caracterización y Evaluación del potencial Expansivo de Suelos Arcillosos en Cabo Rojo; 2008

HIGUERA, C. Estabilización de suelos con el aditivo químico Dynasolo DS-328 en Colombia. 1987.

JONES, D.E y JONES, K.A; Treating Expansive Soils; Civil Engineering; Vol.57, ASCE; 1987

LOW P; Fundamental Mechanisms Involved in Expansion of Clays as Particularly related to clay Mineralogy, Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales in highway designan construction; 1972

MARQUEZ C., Propiedades Ingenieriles de los Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín; 1982

PATRONE J. PREFUMO Enrique J, La Acción De Los Suelos Expansivos Sobre Las Cimentaciones. Métodos De Prevención Y Control, Primeras Jornadas de Ingeniería de Cimentaciones, Universidad de Montevideo, consultado el de Octubre de 2015

QUINTERO L. Leidy J. Caracterización Física, Mecánica, Química y Morfológica de las Arcillas expansivas del Área Metropolitana

## SITIOS WEB

BELTRAN M. Lisandro, Expansión de los Suelos Arcillosos Parcialmente Saturados, Universidad Nacional de Colombia, consultado el 29 de Septiembre de 2015

BELTRAN M.L, Factores Que Afectan El Comportamiento Expansivo De Un Suelo Arcilloso. Expansión Potencial Y Ambiente. Octavo simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Universidad del Cauca. Consultado el 29 de Septiembre de 2015

MUSSO M, ROSTAN A, BEHAK L, Subrasantes Expansivas en Rutas Nacionales. ¿Mito o realidad?, Dto. Geotécnica, IET, Facultad de Ingeniería-UdelaR. Consultado el 27 de Septiembre de 2015. En <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/746/A5.pdf?sequence=5> Consultado el 25 de Septiembre de 2015