

**UNIVERSIDAD DE SEVILLA**

**Doctorado en Recursos Naturales y Medio Ambiente**



**TESIS DOCTORAL**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN ZONAS TROPICALES EN RELACIÓN CON SU GENESIS EN TRES ZONAS PILOTO EN COLOMBIA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

**Yolanda Calderón Larrañaga**

Director

**PhD. , Mario Camilo Torres**  
**Universidad Nacional de Colombia**

Tutora

**PhD., Isabel González Díez**  
**Universidad de Sevilla**

**2022**

*A mis hijos Angélica y Andrés  
mi esposo Alberto, mi padre Hernando  
y en memoria de mi madre Anita*

## RESUMEN

En esta investigación que se presenta como tesis doctoral, se han estudiado suelos finos predominantemente arcillosos en tres zonas piloto en Colombia respecto de su comportamiento esfuerzo – deformación en zonas seleccionadas a partir de criterios asociados a la génesis de los materiales y condiciones geoclimáticas, para así establecer dos aspectos básicos en los análisis planteados: 1.) materiales de origen geológico diferenciado y 2.) materiales sometidos a cambios medio ambientales característicos diferenciales en cada zona. Lo anterior, con el fin de establecer si existen suficientes soportes conceptuales que permitan definir criterios de aplicabilidad de ensayos y modelos geotécnicos específicos que puedan ser usados en los suelos con base en su génesis y evolución.

El estudio parte de una adecuada selección e identificación de tres zonas piloto de estudio desde la megascale hasta escala local a partir de sus características geológicas, geomorfológicas y geoclimáticas predominantes, con base en la construcción de un modelo geológico- geomorfológico fundamentado en criterios geomorfoestructurales y morfogenéticos, aplicable a los fines de esta investigación. Esto dando como resultado, la selección de los siguientes materiales identificados en tres zonas: materiales de origen lacustre (un sector de Sabana de Bogotá, zona piloto 1), volcánico (un sector del departamento de Quindío- Zona piloto 2) y marino costero (un sector del municipio de Barranquilla, zona piloto 3)

Se efectuó una caracterización geomecánica de los suelos identificados en las zonas piloto, seleccionados a partir de criterios de comparabilidad, con el fin de disminuir las incertidumbres en los resultados y poder contrastarlos, a la luz de la información geotécnica obtenida y de la aplicación de modelos para análisis prospectivos del comportamiento de los suelos. En esta caracterización se incluyeron análisis desde la macroestructura hasta la microestructura, llevando a cabo ensayos de laboratorio mecánicos y químicos, además de análisis en estado crítico sobre muestras seleccionadas, y análisis de información producto de ensayos existentes obtenidos a partir de información secundaria.

Se logró obtener una propuesta de modelo geológico – geomorfológico que asocia la génesis de los suelos con la existencia de suelos finos predominantemente arcillosos y relaciona diferentes escalas espacio – temporales, mediante una identificación coherente de áreas de estudio geotécnico local y puntual a nivel de comportamiento geomecánico. Se aplicaron diferentes herramientas y técnicas de laboratorio que no solo incluyen el conocimiento desde la ingeniería geotécnica sino la geología, la

geomorfología, análisis químicos, análisis geoestadísticos y análisis con uso de sistemas de información geográfico, permitiendo generar resultados correlacionables y de mayor confiabilidad a nivel espacio – temporal de polígonos de estudio.

Un resultado de especial importancia se asocia a los suelos de origen volcánico, dado que el uso de técnicas de laboratorio convencionales para identificación de propiedades índice no permite establecer una identificación real de suelos arcillosos, y es necesario el uso de análisis químicos adicionales, con el fin de tener una identificación veraz del tipo de suelos finos presentes. Para el caso de los suelos lacustres y volcánicos se pudo identificar como minerales arcillosos predominantes la caolinita y la moscovita. Sin embargo, la presencia de minerales amorfos en los suelos volcánicos genera una diferencia importante en su comportamiento geomecánico. De especial importancia es el hecho de que los suelos volcánicos y marinos estudiados, presentaron una tendencia a falla frágil en condición pico y posteriormente una falla dúctil en condición residual, mientras que, en el caso de los suelos lacustres, se obtuvo una tendencia a falla dúctil tanto en condición pico como residual.

En general las correlaciones de los índices de consistencia desarrolladas por diferentes autores con las propiedades esfuerzo-deformación de los suelos, generan resultados consistentes para los suelos lacustres y marinos en la mayor parte de los casos, especialmente si se tiene la presencia de montmorillonita como es el caso de la zona piloto 3. Lo anterior no ocurre para los suelos volcánicos en donde se presenta una muy alta dispersión de los resultados que no facilita plantear una tendencia de comportamiento.

El uso de diferentes modelos constitutivos permitió concluir que en general los modelos Mohr Coulomb, Cam Clay y Duncan Chang ofrecen una modelización razonable de los principales elementos del comportamiento tensión desviadora-deformación observado en los ensayos triaxiales CU realizados. Los modelos Mohr Coulomb y Cam Clay aplican especialmente para suelos NC, obteniendo buenos resultados para los suelos lacustres que tienen un grado ligero de sobreconsolidación y un comportamiento que se ajusta más al modelo elasto-plástico. Para los suelos volcánicos el ajuste más adecuado se logró con el modelo hiperbólico Duncan Chang. En general los modelos presentan un buen ajuste en la zona elástica.

El uso del método francés como alternativa cuando la mayor parte de los ensayos que se tienen son de caracterización básica, permite identificar posibles comportamientos esfuerzo – deformación que

se ajustan con las tendencias de materiales finos arcillosos para suelos lacustres. No ocurre igual para suelos volcánicos y marinos, los cuales requieren estudios complementarios para establecer tendencias de comportamiento mecánico.

El desarrollo del presente trabajo representa un avance en la aplicación de estudios de comportamiento geomecánico de suelos para la práctica convencional de la ingeniería, donde se relacionan en forma directa con su génesis. Sin embargo, no solo se debe tener cuenta los resultados de análisis convencionales. Es necesario un trabajo interdisciplinario donde se incluyan estudios de la microfábrica, especialmente para suelos de origen volcánico que han sido afectados a lo largo de su historia y evolución por procesos exógenos y endógenos intensos que han modificado su microestructura y por lo tanto su comportamiento.

## SUMMARY

In this research, presented as a doctoral thesis, fine soils predominantly clayey soils have been studied in three pilot areas in Colombia with respect to their stress - deformation behaviour, in selected areas, based on criteria associated with the genesis of the materials and geoclimatic conditions, in order to establish two basic aspects in the proposed analyses: 1.) materials of differentiated geological origin and 2.) materials subjected to characteristic differential environmental changes in each area. The purpose of this was to establish if there are sufficient conceptual supports to define criteria for the applicability of specific geotechnical tests and models that can be used on soils based on their genesis and evolution.

The study starts from an appropriate selection and identification of three pilot study areas from the mega-scale to the local scale, by taking into account their predominant geological, geomorphological and geoclimatic characteristics, based on the construction of a geological-geomorphological model according to the geomorpho-structural and morphogenetic criteria, applicable to the purposes of this research. This allowed the selection of the following materials identified in three zones: materials of lacustrine origin (a sector of Sabana de Bogotá -Pilot zone 1), volcanic (a sector of the department of Quindío -Pilot zone 2-) and coastal marine (a sector of the municipality of Barranquilla -Pilot zone 3-).

A geomechanical characterisation of the soils identified in the pilot areas was carried out, selected by comparability criteria in order to reduce uncertainties in the results and be able to contrast them with the geotechnical information obtained and the application of models for prospective analysis of soil behaviour. This characterisation included analyses from the macrostructure to the microstructure, mechanical and chemical laboratory tests, critical state analyses on selected samples, and analysis of information from existing tests obtained from secondary sources.

The geological-geomorphological model proposed associates the genesis of the soils with the existence of fine, predominantly clayey soils and relates different spatial-temporal scales by coherently identifying local and specific geotechnical study areas at the level of geomechanical behaviour. Different laboratory tools and techniques were applied that not only include knowledge from geotechnical engineering but also geology, geomorphology, chemical analysis, geostatistical analysis and analysis with the use of geographic information systems, allowing the generation of correlated and more reliable results at the spatial-temporal level of study polygons.

A particularly important result is associated with soils of volcanic origin, given that the use of conventional laboratory techniques for the identification of index properties does not allow a real identification of clayey soils, making it necessary to use additional chemical analyses in order to have a true identification of the type of fine soils present. In the case of lacustrine and volcanic soils, kaolinite and muscovite were identified as the predominant clay minerals. However, the presence of amorphous minerals in the volcanic soils generates an important difference in their geomechanical behaviour. Of special importance is the fact that the volcanic and marine soils studied showed a tendency to brittle failure in peak condition and later ductile failure in residual condition, while in the case of the lacustrine soils, a tendency to ductile failure was obtained in both peak and residual condition.

In general, the correlations of the consistency indices developed by different authors with the stress-strain properties of the soils provide consistent results for lacustrine and marine soils in most cases, especially if montmorillonite is present, as is the case in pilot zone 3. This is not the case for volcanic soils, where there is a very high dispersion of results that does not make it easy to establish a behavioural trend.

The use of different constitutive models led to the conclusion that in general, the Mohr Coulomb, Cam Clay and Duncan Chang models offer a reasonable modelling of the main elements of the deflective stress-strain behaviour observed in the triaxial CU tests performed. The Mohr Coulomb and Cam Clay models apply especially for NC soils, obtaining good results for lacustrine soils, which have a slight degree of overconsolidation and a behaviour more in line with the elasto-plastic model. For volcanic soils the best fit was achieved with the Duncan Chang hyperbolic model. In general the models show a good fit in the elastic zone.

The use of the French method as an alternative when most of the tests available are of basic characterisation, allows for identifying possible stress-strain behaviours that fit with the tendencies of fine clayey materials for lacustrine soils. This is not the case for volcanic and marine soils, which require complementary studies to establish trends in mechanical behaviour.

The development of the present work represents an advance in the application of geomechanical behaviour studies of soils for conventional engineering practice, where they are directly related to their genesis. However, considering the results of conventional analyses alone are not enough. It is necessary to include an interdisciplinary work with study of the micro-factory - especially for soils of volcanic origin,

which have been affected throughout their history and evolution by intense exogenous and endogenous processes that have modified their microstructure and therefore their behaviour.



## AGRADECIMIENTOS

Bastante complicado al final de un largo proceso de trabajo e investigación, es afrontar los agradecimientos de una Tesis Doctoral. A lo largo no solo de este tiempo, sino de mi historia profesional, he recibido el apoyo y la guía de varias personas e instituciones que han contribuido desde diferentes puntos al logro de mis objetivos como profesional y como persona. Aunque son muchas personas e instituciones, espero mencionarlas a la mayoría de ellas, ofreciendo disculpas anticipadas a los que pudieran quedar por fuera de estas líneas.

A nivel institucional un enorme agradecimiento al Servicio Geológico Colombiano (SGC), institución que ha sido parte fundamental en mi formación como profesional, por el apoyo a esta investigación a través del uso de sus laboratorios, personal técnico y equipos, además de la inmensa contribución que representó facilitar el material de estudio e información, sin el cual esta investigación no hubiera podido ser desarrollada. Naturalmente, debo agradecer a la Universidad de Sevilla, por abrirme las puertas como investigador con un trabajo que, aunque a distancia, ha sido siempre apoyado mediante formación y guía por parte de la Universidad. Igualmente, a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y la Universidad Militar Nueva Granada en donde también se desarrolló parte de la experimentación de laboratorio contando con el apoyo de personal técnico y equipos especializados.

Desde lo personal, debo agradecer al director de mi tesis, el Ingeniero Mario Camilo Torres de la Universidad Nacional de Colombia, por su guía, preocupación y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo de investigación, quien a pesar de sus múltiples ocupaciones siempre estuvo atento a brindarme su apoyo incondicional. Igualmente, a la profesora Isabel González Díez de la Universidad de Sevilla, quien, a través de su seguimiento y valiosos aportes, me dio esta oportunidad. Gracias por abrirme un espacio importante para continuar con el reto que significó este trabajo y empujarme a seguir mejorando día a día y confiar en mí.

Muy especialmente agradezco al Dr. Hernando Alberto Camargo director de Laboratorio del Servicio Geológico Colombiano y el geólogo Héctor Enciso, quienes brindaron su apoyo y dieron soporte a esta propuesta de investigación, así como a los compañeros de trabajo del grupo de Laboratorio del SGC en general y el grupo de técnicos de los laboratorios de Geotecnia, cuyo apoyo desinteresado y amistad permitió alcanzar este logro.

Agradezco a todo el grupo de profesores y colaboradores de la Universidad de Sevilla, quienes siempre han estado atentos a la culminación de este trabajo en la mejor forma posible, buscando caminos y soluciones a los diferentes problemas que se han presentado a lo largo de este trabajo.

Finalmente, y de mayor importancia para mí, es agradecer en primer lugar a Dios que me permitió llegar a este momento, y a mi familia, especialmente a mis hijos Angélica y Andrés, y mi esposo Alberto, quienes me apoyaron a iniciar y continuar con este reto en una etapa de la vida en la cual no se esperaría estar enfrentando este tipo de luchas. Igualmente, agradezco a mis padres: Hernando, quien aún continúa acompañándome, y mi madre Anita, a quien hoy doy las gracias por enseñarme la constancia, el trabajo y la alegría para seguir adelante, aunque hoy no se encuentre con nosotros.

Yolanda Calderón Larrañaga

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	25
1.1	Antecedentes y objetivos.....	27
1.2	Objetivos.....	35
1.3	Contenido de la Tesis.....	36
2	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE GEOLÓGICO – GEOMORFOLÓGICO.....	39
2.1	Marco geográfico de las zonas de estudio.....	39
2.1.1	Sabana de Bogotá.....	44
2.1.2	Departamento del Quindío.....	45
2.1.3	Municipio de Barranquilla.....	46
2.2	Entorno Geológico - Geomorfológico Regional de las zonas de estudio.....	48
2.2.1	Sabana de Bogotá.....	48
2.2.2	Departamento del Quindío.....	52
2.2.3	Municipio de Barranquilla.....	54
2.3	Consideraciones Generales.....	58
3	METODOLOGÍA.....	61
3.1	Revisión estado del arte y análisis de antecedentes.....	61
3.2	Generación de modelo geológico – geomorfológico para la identificación de zonas de estudio desde escala regional a escala y media y local por zona piloto.....	62
3.3	Construcción de base de datos geotécnica para identificación de puntos de exploración.....	65
3.4	Trabajos de Oficina Fase 1.....	67
3.5	Trabajos de campo (exploración geotécnica).....	69
3.6	Trabajos de Laboratorio.....	70
3.6.1	Caracterización Básica (física y química – Sistema de Clasificación).....	72
3.6.2	Fluorescencia de rayos X -FRX.....	77
3.6.3	Ensayos para el análisis del comportamiento esfuerzo – deformación.....	79
3.7	Trabajos de Oficina Fase 2.....	80
3.8	Discusión General.....	81
4	ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES.....	83
4.1	ESTADO DEL ARTE.....	83
4.1.1	Aspectos de importancia para identificar el origen y evolución de los materiales arcillosos desde la morfogenética en las zonas piloto en evaluación.....	84

4.1.2	La geotecnia aplicada para la caracterización del comportamiento de los materiales geotécnicos finos: arcillas y limos .....	91
4.1.3	Fábrica y Estructura .....	93
4.1.4	Minerales arcillosos .....	97
4.1.5	Historia de esfuerzos y propiedades Esfuerzo – Deformación .....	100
4.1.6	Condición de carga y resistencia al corte.....	103
4.1.7	Los Modelos constitutivos en la modelación del comportamiento de materiales geotécnicos arcillosos .....	108
4.2	ANTECEDENTES.....	115
4.2.1	Unidades Geológicas Superficiales y Geomorfología.....	115
4.3	CONSIDERACIONES GENERALES.....	125
5	RESULTADOS .....	130
5.1	Modelo geológico – geomorfológico por zona piloto.....	131
5.1.1	Sabana de Bogotá .....	131
5.1.2	Departamento de Quindío .....	132
5.1.3	Municipio de Barranquilla.....	132
5.1.4	Análisis integrado de los modelos geológico – geomorfológicos .....	144
5.2	Base de datos geotécnico a partir de información secundaria.....	145
5.3	Resultados de análisis estadístico de información geotécnica de base de datos por zona piloto para caracterización básica y geomecánica .....	157
5.4	Resultados de exploración geotécnica por zona piloto y perfiles estratigráficos para Sabana de Bogotá y Quindío. ....	158
5.4.1	Exploración y muestreo Municipio de Tabio – Sabana de Bogotá.....	159
5.4.2	Exploración y muestreo Municipios de Montenegro y Tebaida – Departamento de Quindío	164
5.5	Construcción de modelos y perfiles geológicos por zona piloto con el uso del programa QGIS versión 3.4.8. y AutoCAD 2018 .....	169
5.6	Resultados laboratorio físico – químico- geomecánico de muestras Sabana de Bogotá y Quindío producto de exploración geotécnica directa .....	182
5.6.1	Ensayos de caracterización básica efectuados sobre muestras producto de exploración directa -2019- 2021.....	192
5.6.2	Variabilidad propiedades índice por zona piloto .....	197
5.6.3	Ensayo de Compresibilidad y deformabilidad efectuados sobre muestras producto de exploración directa -2019- 2021 .....	207
5.6.4	Ensayos de Resistencia efectuados sobre muestras producto de exploración directa - 2019- 2021 .....	211

5.6.5	Ensayos Químicos efectuados sobre muestras producto de exploración directa -2019-2021	220
5.6.6	Composición mineralógica predominante por zona piloto .....	237
5.7	Discusión general y conclusiones.....	241
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	246
6.1	Análisis estadístico de resultados de los ensayos de laboratorio de información primaria y secundaria existente por zona piloto para caracterización básica, resistencia y deformación.....	246
6.1.1	Clasificación de los suelos .....	248
6.1.2	Análisis de Comportamientos especiales de los suelos finos a partir de sus propiedades índice por zona piloto .....	251
6.1.3	Análisis de la resistencia al corte de los suelos en condiciones drenadas y no drenadas por zona piloto .....	256
6.1.4	Análisis de la compresibilidad del suelo .....	269
6.1.5	Relación entre el esfuerzo efectivo y el Esfuerzo de Preconsolidación.....	272
6.2	Aplicación de modelos de caracterización geotécnica de los suelos para las zonas piloto.....	272
6.2.1	Adaptación al modelo francés .....	277
6.2.2	Modelo Mohr Coulomb, Cam Clay y Duncan Shang .....	293
6.3	Discusión general y conclusiones.....	315
6.3.1	Origen geológico y propiedades físicas básica.....	315
6.3.2	Estado de esfuerzos y deformación .....	319
6.3.3	Correlaciones de interés de las propiedades índice con propiedades esfuerzo - deformación de los suelos .....	322
7	CONCLUSIONES.....	325

## TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1 Acercamiento metodológico para selección de puntos de exploración primaria (fuente propia)	40
Figura 2.2 Localización de las zonas de estudio para el desarrollo de esta investigación.....	43
Figura 2.3 Localización Sabana de Bogotá y división administrativa. (Fuente: Tomado y modificado de IGAC; tomado de <a href="http://omoscundinamarca.weebly.com/la-sabana-de-bogotaacute.html">omoscundinamarca.weebly.com/la-sabana-de-bogotaacute.html</a> ).....	44
Figura 2.4 Localización de Bogotá, en la parte Sur de la Sabana. Fuente: Tomado y modificado del Google Earth (2017). .....	45
Figura 2.5 Localización Departamento del Quindío y división administrativa. (Fuente: Tomado y modificado de IGAC tomado de <a href="https://jorivanmr.wordpress.com/">https://jorivanmr.wordpress.com/</a> ) .....	46
Figura 2.6 Localización de Barranquilla -capital del Departamento del Atlántico.....	47
Figura 2.7. Mapa geológico de la Sabana de Bogotá. Adaptado de POMCA del río Bogotá (2018). .....	50
Figura 2.8 Mapa geológico generalizado del departamento del Quindío. Tomado de INGEOMINAS (1999)	54
Figura 2.9 Marco geológico tectónico regional del Municipio de Barranquilla. (Fuente: Modificado de Google earth, 2017.) .....	55
Figura 2.10 Mapa Geológico y secuencia litoestratigráfica del área metropolitana de Barranquilla (Fuente: adaptado INGEOMINAS 1997).....	56
Figura 2.11 Mapa Geológico de las laderas occidentales de Barranquilla, escala 1:10.000 (Fuente: INGEOMINAS 1997) .....	57
Figura 3.1 Enfoque metodológico del estudio (Fuente: Propia).....	63
Figura 3.2 Proceso esquemático de selección de zonas piloto de estudio de escala regional a escala media - Parte 1 (fuente propia) .....	64
Figura 3.3 Variables incluidas en la base de datos de información geotécnica (fuente propia) .....	67
Figura 3.4 Proceso esquemático de selección de zonas piloto de estudio de escala local - Parte 2 (fuente propia).....	69
Figura 3.5. Equipo de perforación por rotoperCUSión (fuente propia) .....	70
Figura 3.6 Esquema de preparación de muestras para la identificación de minerales de arcilla por difracción de rayos X – DRX (tomado de Justo y Morillo, 1999).....	76
Figura 3.7 Proceso de preparación de la muestra para leer en la plataforma spinner. A. Equipo de montaje. B. Disposición de la muestra. C. Depósito de la muestra en portamuestra. D. Uso del pistón para presionar. E. Eliminación del exceso de muestra. F. Muestra lista para colocar en el portamuestra	77
Figura 4.1 Relación de escalas espacio–temporales y aspectos claves para abordar el estudio de suelos finos predominantemente arcillosos (adaptado de Torres y Alarcón, 2011). .....	92
Figura 4.2 Influencia de la estructura en la resistencia. Se presenta la variación en la condición de esfuerzos al someter el mismo tipo de material a diferentes procesos que modifican su estructura interna en esfuerzos normalizados. Tomado de Rampello (1998).....	94
Figura 4.3 Tipos de microfábricas fundamentales del suelo (Alonso et al., 1987). .....	96
Figura 4.4 Esquema de trayectorias de esfuerzos. En línea punteada se ilustran trayectorias de esfuerzos totales mientras las líneas continuas muestran trayectorias de esfuerzos efectivos (Tomado de Verruijt (2001))......	104
Figura 4.5 Valores del índice de viscosidad. Tomado de Krieg (2000).....	105

Figura 4.6 Elementos básicos del comportamiento de los suelos. Envoltorio de falla de los suelos y zonas o rangos de comportamiento esfuerzo-deformación en que se puede encontrar. Zona 1 lineal y elástico, la zona 2 no lineal pero elástico, zona 3 visco-plástico. Tomado de Leroueil (2001).....	106
Figura 4.7. Trayectoria de carga (L) y colapso (C) llevando la LC a una misma posición final en el espacio p-s (tomado de Gimaraes, 2002) .....	106
Figura 4.8. Trayectoria de tensiones para un ensayo drenado y un ensayo no drenado (izquierda). Utilizando las reglas del modelo Cam-clay, todos los ensayos, drenados y no drenados, trazan una misma trayectoria normalizada (derecha). Datos de ensayos sobre caolín de Balasubramaniam (1969) (tomado de Gens, 2005) .....	111
Figura 4.9 Ensayo triaxial CD (Tomado de Chacón,2004) .....	112
Figura 4.10 A la derecha mapa de UGS (adaptado de POMCA ,2018) y a la izquierda Mapa de Unidades y Subunidades geomorfológicas (tomado de SGC, 2005) .....	119
Figura 4.11 Mapa Geomorfológico del departamento del Quindío. (fuente INGEOMINAS, 2005).....	122
Figura 4.12 Unidades Geológicas Superficiales sector Loma Roja en el municipio de Barranquilla (Tomado de INGEOMINAS, 2011) .....	124
Figura 5.1 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Sabana de Bogotá: UGS- Subunidades geomorfológicas- Información geotécnica (fuente propia).....	136
Figura 5.2 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Sabana de Bogotá – mapa zonas polígonos de exploración (fuente propia) .....	137
Figura 5.3 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Quindío: UGS- Subunidades geomorfológicas- Información geotécnica (fuente propia) .....	141
Figura 5.4 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Quindío – mapa zonas polígonos de exploración (fuente propia) .....	142
Figura 5.5 Localización de los puntos de exploración en el municipio de Tabio- Sabana de Bogotá (Fuente: Elaboración propia). .....	160
Figura 5.6 Perfil litológico de la perforación S2 en Tabio- Sabana de Bogotá. ....	161
Figura 5.7 Perfil litológico de la perforación TAB1 en Tabio- Sabana de Bogotá. ....	162
Figura 5.8 a) Equipo de perforación; b) Detalle montaje equipo de; c), d) Muestra recuperada de material arcilloso con vetas oscuras. ....	163
Figura 5.9 Localización de los puntos de exploración en el municipio de Quindío. En color rojo se identifica la exploración geotécnica desarrollada entre 2019 y 2021 y en color verde los puntos de exploración producto de la información secundaria existente (Fuente: Elaboración propia) .....	165
Figura 5.10 Perfil litológico de la perforación MN-1 en Montenegro – Quindío.....	166
Figura 5.11 Perfil litológico de la perforación TEB-3 en La Tebaida– Quindío.....	167
Figura 5.12 a) Panorámica zona de muestreo; b) Equipo de perforación; c), d), e) f) Detalle de sistema de muestreo y muestra obtenida. ....	168
Figura 5.13 Localización puntos de exploración geotécnica información secundaria y directa en Sabana de Bogotá (fuente propia).....	170
Figura 5.14 Ubicación de los puntos de exploración en modelo DTM _ Sabana de Bogotá (fuente propia) .....	171
Figura 5.15 Polilíneas aplicadas para el modelo en Sabana de Bogotá (fuente propia).....	172
Figura 5.16 Esquema de localización de perfiles estratigráficos, información geotécnica e interpretación estratigráfica del perfil (fuente propia) .....	173

Figura 5.17 Perfiles geológico- geotécnico tipo Sabana de Bogotá- Municipio de Tabio- Parte A (fuente propia).....	174
Figura 5.18 Perfiles geológico- geotécnicos tipo Sabana De Bogotá- Municipio de Tabio- Parte B- Convenciones y coordenadas (fuente propia).....	175
Figura 5.19 Perfiles geológico- geotécnico tipo Quindío- municipio de Montenegro- Parte A (fuente propia).....	176
Figura 5.20 Perfiles geológico- geotécnico tipo Quindío- municipio de Montenegro y Tebaida- Parte A (fuente propia).....	177
Figura 5.21 Perfiles geológico- geotécnico tipo Quindío- municipio de Montenegro- Parte A y B (fuente propia).....	178
Figura 5.22 Perfiles geológico- geotécnicos Quindío- Municipio de Montenegro- Parte B-Convenciones y coordenadas (fuente propia).....	179
Figura 5.23 Perfiles geológico- geotécnicos Quindío- Municipio de Montenegro y Tebaida- Parte B- Convenciones y coordenadas (fuente propia).....	180
Figura 5.24 Perfiles geológico- geotécnico Barranquilla- sector Loma Roja- Parte A y B (fuente propia)	181
Figura 5.25 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipio de Tabio con base en información secundaria- Sabana de Bogotá.....	199
Figura 5.26 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipios Montenegro, Tebaida y Armenia información primaria- Quindío.....	203
Figura 5.27 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipio de Barranquilla, sector Loma Roja.....	205
Figura 5.28 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipio de Barranquilla, sector Loma Roja.....	206
Figura 5.29 Equipos usado para el ensayo edométrico (fuente propia).....	208
Figura 5.30 Muestras recuperadas en el municipio de Tabio Cundinamarca (fuente propia).....	208
Figura 5.31 Esquema de curva de consolidación procedente de un ensayo de consolidación.....	211
Figura 5.32 Equipo de corte directo marcar CONTROLS usado para la ejecución de ensayos de corte directo.....	213
Figura 5.33 Equipo triaxial GDS, en la parte a) se presenta el equipo triaxial utilizado para las pruebas y en la parte b) se presentan los controladores de Presión / volumenFigura.....	214
Figura 5.34 Equipo triaxial GDS, en la parte a) se presenta la probeta M2 y en la parte b) se las probetas instaladas en los controladores.....	214
Figura 5.35 Muestras al final de la etapa de corte en el ensayo Triaxial – parte a; Muestras después del secado parte b. ....	216
Figura 5.36 Parámetros de resistencia a partir de ensayos de compresión simple zona piloto 1.....	218
Figura 5.37 Parámetros de resistencia a partir de ensayos de compresión simple zona piloto 2.....	218
Figura 5.38 Parámetros de resistencia a partir de ensayos de compresión simple zona piloto 3.....	219
Figura 5.39 Relación entre el módulo $E_u$ y $S_u$ para las tres zonas piloto.....	220
Figura 5.40 Difractogramas muestras S-2 Tabio – Sabana de Bogotá.....	227
Figura 5.41 Difractogramas muestras Tab-1 Tabio – Sabana de Bogotá.....	228
Figura 5.42 Difractogramas muestras MN-1- Montenegro- Quindío.....	229
Figura 5.43 Difractogramas muestras TEB-3- Tebaida- Quindío.....	230
Figura 5.44 Difractogramas ensayo DRX- muestras M2, M6, M7 Y M11, Zona piloto 3, Municipio de Barranquilla- Fases Cristalinas Mt ( montmorillonita), micas (I y M Muscovita), K (caolinita), C ( calcita).	



Los picos denotados por asteriscos están asociados posiblemente con interestratificados (tomado de Rodríguez, 2011). .....	232
Figura 5.45 Espectro FTIOR para la fracción fina (< 0.075 mm) de las arcillas de Barranquilla, M2, M7, M11, Fases cristalinas: F feldespatos, Qz cuarzo. (tomado de Rodríguez, 2011) .....	233
Figura 5.46 Variación de elementos en muestras S-2 y TAB-1 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá, ensayo FRX .....	238
Figura 5.47 Variación de minerales en muestras S-2 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá, ensayo DRX .....	238
Figura 5.48 Variación de elementos en muestras S-2 y TAB-1 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá, ensayo FRX .....	240
Figura 5.49 Variación de minerales en muestras MN-1 y TEB-3 municipios de Montenegro y Tebaida – Quindío, ensayo DRX .....	240
Figura 6.1 Variación de Su (Laboratorio) con la profundidad para las tres zonas piloto .....	256
Figura 6.2 Variación de la cohesión pico y residual y la fricción pico y residual en condición CD (Laboratorio) con la profundidad para la zona piloto 1 .....	261
Figura 6.3 Variación de la cohesión pico y residual y la fricción pico y residual en condición CD (Laboratorio) con la profundidad para la zona piloto 2 .....	262
Figura 6.4 Variación de la cohesión pico y residual y la fricción pico y residual en condición CD (Laboratorio) con la profundidad para la zona piloto 3 .....	263
Figura 6.5 Variación típica del esfuerzo cortante $\tau$ en condición pico y residual con la deformación horizontal para la zona piloto 1 .....	266
Figura 6.6 Variación típica del esfuerzo cortante $\tau$ en condición pico y residual con la deformación horizontal para la zona piloto 2 .....	266
Figura 6.7 Variación típica del esfuerzo cortante $\tau$ en condición pico y residual con la deformación horizontal para la zona piloto 3 .....	267
Figura 6.8 Variación de Cs y Cc a partir de datos de laboratorio con la profundidad por zona piloto ....	270
Figura 6.9 Relaciones obtenidas entre Cs y Cc a partir de datos de laboratorio por zona piloto .....	271
Figura 6.10 Variación del esfuerzo vertical efectivo, el esfuerzo de preconsolidación y la relación de sobreconsolidación RSC con la profundidad para la zona piloto 1 .....	273
Figura 6.11 Variación del esfuerzo vertical efectivo, el esfuerzo de preconsolidación y la relación de sobreconsolidación RSC con la profundidad para la zona piloto 2 .....	274
Figura 6.12 Variación del esfuerzo vertical efectivo, el esfuerzo de preconsolidación y la relación de sobreconsolidación RSC con la profundidad para la zona piloto 3 .....	275
Figura 6.13 Variación del Límite Líquido contra el Índice Plástico para la zona 1: Sabana de Bogotá- municipio de Tabio .....	279
Figura 6.14 Variación del Límite Líquido contra el Índice Plástico para la zona 2: Quindío- municipios de Montenegro, Tebaida y Armenia .....	279
Figura 6.15 Variación del Límite Líquido contra el Índice Plástico para la zona 3: Municipio de Barranquilla – Sector de Loma Roja .....	280
Figura 6.16 Variación del Índice de consistencia Ic con el Índice Plástico Ip por zona piloto .....	282
Figura 6.17 Variación del Índice de consistencia Ic con la profundidad por zona piloto .....	283
Figura 6.18 Variación del Índice de consistencia Ic con el Límite Plástico por zona piloto .....	283
Figura 6.19 Correlación entre el Límite Líquido y el Índice de compresión Cc zona piloto 1 .....	284
Figura 6.20 Correlación entre el Límite Líquido y el Índice de compresión Cc zona piloto 2 .....	285

Figura 6.21 Correlación entre el Límite Líquido y el Índice de compresión $C_c$ zona piloto 3 .....	285
Figura 6.22 Variación del ángulo de fricción con el Índice de plasticidad .....	287
Figura 6.23 Variación de $S_u/\sigma_{vo}$ con la profundidad para la zona piloto 1 .....	289
Figura 6.24 Variación de $S_u/\sigma_{vo}$ con la profundidad para la zona piloto 2 .....	290
Figura 6.25 Variación de $S_u/\sigma_{vo}$ con la profundidad para la zona piloto 3 .....	290
Figura 6.26 relaciones entre el módulo de elasticidad no drenado $E_u$ y la resistencia al corte no drenado $S_u$ y el módulo de elasticidad no drenado $E_u$ zona piloto 1 .....	292
Figura 6.27 relaciones entre el módulo de elasticidad no drenado $E_u$ y la resistencia al corte no drenado $S_u$ y el módulo de elasticidad no drenado $E_u$ zona piloto 2 .....	292
Figura 6.28 relaciones entre el módulo de elasticidad no drenado $E_u$ y la resistencia al corte no drenado $S_u$ y el módulo de elasticidad no drenado $E_u$ zona piloto 3 .....	292
Figura 6.29 Malla de Elementos Finitos .....	294
Figura 6.30 Vectores de desplazamiento de muestra cilíndrica en condición de falla .....	294
Figura 6.31 Relación entre el ángulo de fricción $N_C$ y el Índice de Plasticidad, Das, Braja, 1983. ....	296
Figura 6.32 Relación entre el ángulo de fricción $SC$ y el Índice de Plasticidad, Das, Braja, 1983. ....	297
Figura 6.33 Diagrama conceptual para obtener la cohesión $c_e$ . ....	297
Figura 6.34 Envolventes de trayectorias modelo Mohr Coulomb zona piloto 1-TAB 1 .....	302
Figura 6.35 Envolventes de trayectorias modelo Mohr Coulomb zona piloto 2-TEB 3 .....	303
Figura 6.36 Envolventes de trayectorias modelo Cam Clay zona piloto 1-TAB 1 .....	305
Figura 6.37 Envolventes de trayectorias modelo Cam Clay zona piloto 2- TEB-3 .....	306
Figura 6.38 Comparativa de curvas $\sigma - \varepsilon$ de los ensayos de compresión simple y calculadas mediante el modelo de MC para las muestras zona piloto 1 – Sabana con $\sigma'_v$ de 100 kPa .....	307
Figura 6.39 Comparativa de curvas $\sigma - \varepsilon$ de los ensayos de compresión simple y calculadas mediante el modelo de MC para las muestras zona piloto 2- Quindio con $\sigma'_v$ de 100 kPa .....	307
Figura 6.40 Comparativa de curvas $\sigma - \varepsilon$ de los ensayos de compresión simple y calculadas mediante el modelo de MC para las muestras zona piloto 3- Barranquilla con $\sigma'_v$ de 100 kPa .....	308
Figura 6.41 Relación esfuerzo y deformación y modelo hiperbolico por punto de carga modelo Duncan Chang zona piloto 1-TAB 1- M3 Y M4 .....	311
Figura 6.42 Relación esfuerzo y deformación y modelo hiperbolico por punto de carga modelo Duncan Chang zona piloto 1-TAB 1- M7 Y M8 .....	312
Figura 6.43 Relación esfuerzo y deformación y modelo hiperbolico por punto de carga modelo Duncan Chang zona piloto 1-TEB 3- TAB 1- M6 y M7 .....	313
Figura 6.44 Relación entre el módulo elástico y el esfuerzo normal modelo Duncan Chang integrado zona piloto 1-TAB 1 .....	314
Figura 6.45 Relación entre el módulo elástico y el esfuerzo normal modelo Duncan Chang integrado zona piloto 2- TEB 3 .....	314

## TABLA DE TABLAS

Tabla 2.1 Áreas a Escala Regional Seleccionadas para el Estudio.....	43
Tabla 2.2 Unidades litoestratigráficas de interés geológico para esta investigación en Sabana de Bogotá. .....	51
Tabla 2.3 Unidad litoestratigráfica de interés geológico para esta investigación en el departamento del Quindío (fuente propia) .....	53
Tabla 2.4 Subunidades litoestratigráficas de interés geológico para esta investigación en el departamento del Quindío (fuente propia).....	53
Tabla 2.5 Unidades litoestratigráficas de interés geológico para esta investigación en el municipio de Barranquilla (fuente propia) .....	57
Tabla 4.1 Relación de procesos Geodinámicos y Categorías Geomorfológicas (adaptado INGEOMNAS 2005) .....	88
Tabla 4.2 Relación de las regiones morfogenéticas y las regiones climáticas definidas por Peltier 1953 en Thornbury (1960) y Caldas – Lang en Eslava 1994 respectivamente para las zonas piloto en evaluación	89
Tabla 4.3 Clasificación del clima ambiental según metodología de la Subdirección Agrológica de Instituto Geográfico Agustín Codazzi) .....	90
Tabla 4.4 Técnicas para el estudio de la fábrica de suelos .....	95
Tabla 4.5 Parámetros constitutivos de Mohr – Coulomb (adaptado de Vintimilla, Ávila, 2004) .....	110
Tabla 4.6 Parámetros constitutivos de Cam-clay (adaptado de Chacón, 2004) .....	113
Tabla 4.7 Parámetros constitutivos de modelo hiperbólico Duncan - Chang (adaptado de Vintimilla, Avila 2004) .....	114
Tabla 4.8 Unidades Geológicas Superficiales – UGS de interés geológico para esta investigación en Sabana de Bogotá (fuente propia).....	116
Tabla 4.9 Consolidado Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en Sabana de Bogotá (adaptado SGC, 2005). .....	118
Tabla 4.10 Unidades Geológicas Superficiales – UGS de interés geológico para esta investigación en departamento del Quindío (fuente propia).....	120
Tabla 4.11 Consolidado Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en el departamento del Quindío (adaptado SGC, 2005) .....	121
Tabla 4.12 Unidades Geológicas Superficiales sector Loma Roja en el municipio de Barranquilla (Tomado de INGEOMINAS, 2011) .....	123
Tabla 4.13 Consolidado Unidades y subunidades geomorfológicas de interés en el municipio de Barranquilla (adaptado SGC, 2010).....	125
Tabla 5.1 Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Sabana de Bogotá- parte 1- Geología.....	133
Tabla 5.2 Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Sabana de Bogotá- parte 1- Geomorfología- información edáfica .....	134
Tabla 5.3 Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Sabana de Bogotá- parte 1- clima- nivel freático .....	135
Tabla 5.4 Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Quindío- parte 1- Geología .....	138
Tabla 5.5 Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Quindío- parte 2- Geomorfología- información edáfica.....	139

Tabla 5.6 Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Quindío- parte 3- clima.....	140
Tabla 5.7 Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Municipio de Barranquilla.....	143
Tabla 5.8 Información de muestreo geotécnico para las tres zonas piloto almacenada en base de datos para análisis básico (adaptado SGC, 2010) .....	146
Tabla 5.9 Información de muestreo geotécnico para las tres zonas piloto almacenada en base de datos por municipio y localidad (adaptado SGC, 2010).....	146
Tabla 5.10 Revisión de información y localización cartográfica de Sondeos para Quindío (fuente propia) .....	148
Tabla 5.11 Criterios de comparabilidad para el desarrollo de análisis primarios para Sabana de Bogotá (fuente propia).....	149
Tabla 5.12 Criterios de comparabilidad para el desarrollo de análisis primarios para Quindío (fuente propia).....	149
Tabla 5.13 Criterios de comparabilidad para el desarrollo de análisis primarios para Barranquilla (fuente propia).....	150
Tabla 5.14 Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Tabio (zona piloto 1). (fuente propia).....	152
Tabla 5.15 Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Tebaida -Quindío (zona piloto 2). Parte 1 .....	153
Tabla 5.16 Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Montenegro -Quindío (zona piloto 2). Parte 2.....	154
Tabla 5.17 Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Armenia -Quindío (zona piloto 2). Parte 3 .....	155
Tabla 5.18 Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Barranquilla – Sector Loma Roma ((zona piloto 3). En rojo los puntos que no tienen coordenadas. (fuente propia)).....	156
Tabla 5.19 Localización sondeos, profundidad y numero de muestras Zona Piloto 1- municipio de Tabio- Sabana de Bogotá .....	159
Tabla 5.20 Localización sondeos, profundidad y numero de muestras Zona Piloto 2- municipio de Tabio- Sabana de Bogotá .....	164
Tabla 5.21 Ensayos de caracterización básica realizados a muestras recuperadas para Sabana de Bogotá y Quindío.....	184
Tabla 5.22 Ensayos de caracterización básica realizados a muestras recuperadas para Quindío.....	185
Tabla 5.23 Ensayos de resistencia, deformación y ensayos químicos realizados a muestras recuperadas para Sabana de Bogotá y Quindío.....	186
Tabla 5.24 Ensayos de resistencia, deformación y ensayos químicos realizados Barranquilla – Sector Loma Roja (Producto información secundaria) .....	188
Tabla 5.25 Ensayos de caracterización básica realizados, algunas correlaciones y norma aplicada (fuente propia).....	190
Tabla 5.26 Ensayos de resistencia y deformación realizados, correlaciones y norma aplicada (fuente propia).....	191
Tabla 5.27 Consolidados resultados de laboratorio caracterización básica por nivel litológico S-2 Sabana de Bogotá.....	193

Tabla 5.28 Consolidados resultados de laboratorio caracterización básica por nivel litológico TAB-1 Sabana de Bogotá .....	194
Tabla 5.29 Consolidados resultados caracterización básica por nivel litológico MN-1, Montenegro-Quindío.....	195
Tabla 5.30 Consolidados resultados caracterización básica por nivel litológico TEB-3, Tebaida- Quindío .....	196
Tabla 5.31 Valores de las propiedades índice promedio municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información secundaria .....	198
Tabla 5.32 Valores de las propiedades índice promedio municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información primaria .....	198
Tabla 5.33 Valores de las propiedades índice promedio municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información primaria y secundaria .....	199
Tabla 5.34 Valores de las propiedades índice promedio municipios Montenegro, Armenia y Tebaida-Quindío- Información secundaria .....	201
Tabla 5.35 Valores de las propiedades índice promedio municipios Montenegro, Armenia y Tebaida-Quindío- Información primaria de campo .....	201
Tabla 5.36 Valores de las propiedades índice promedio municipios Montenegro, Armenia y Tebaida-Quindío- Información secundaria y primaria de campo .....	202
Tabla 5.37 Valores de las propiedades índice promedio municipio Barranquilla- Sector Loma Roja Información secundaria .....	204
Tabla 5.38 Valores medios del índice de consistencia tres zonas piloto (fuente propia).....	207
Tabla 5.39 Escalones de carga y descarga ensayo edométrico .....	209
Tabla 5.40 Presiones de cámara y contrapresión para la realización del ensayo triaxial por punto.....	215
Tabla 5.41 Presiones configuradas para la etapa de corte para el ensayo triaxial.....	215
Tabla 5.42 Consolidado resultados de laboratorio resistencia y deformación sondeos S-2 y TAB-1 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá.....	217
Tabla 5.43 Consolidado resultados de laboratorio resistencia y deformación sondeos MN-1 y TB-3 municipios de Montenegro y Tebaida – departamento de Quindío .....	217
Tabla 5.44 ensayos químicos DRX - S-2 Tabio – Sabana de Bogotá .....	224
Tabla 5.45 Resultados ensayos químicos DRX - TAB-1 Tabio – Sabana de Bogotá.....	225
Tabla 5.46 Resultados ensayos químicos DRX MN1 Y TEB-3, municipios de Montenegro y Tebaida - Quindío.....	226
Tabla 5.47 Resultados ensayos químicos DRX-FRX S-2 Y Tab-1 Tabio – Sabana de Bogotá. Parte 1.....	235
Tabla 5.48 Resultados ensayos químicos DRX-FRX S-2 Y Tab-1 Tabio – Sabana de Bogotá. Parte 2.....	235
Tabla 5.49 Resultados ensayos químicos FRX, MN1 Y TEB-3, municipios de Montenegro y Tebaida - Quindío.....	236
Tabla 5.50 Composición química predominante de los materiales muestreados en los municipios de Montenegro, Tebaida y Armenia - Quindío- Información primaria y secundaria, obtenidos mediante el ensayo FRX.....	239
Tabla 6.1 Porcentaje de tipo de suelos de acuerdo con la clasificación SUCS en el municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información primaria y secundaria.....	249
Tabla 6.2 Porcentaje de tipo de suelos de acuerdo con la clasificación USCS en los municipios de Montenegro, Tebaida y Armenia - Quindío- Información primaria y secundaria .....	250

Tabla 6.3 Porcentaje de tipo de suelos de acuerdo con la clasificación USCS en el sector Loma Roja- Municipio de Barranquilla- Información primaria y secundaria- Zona Piloto 3.....	251
Tabla 6.4 Actividad de los suelos finos arcillosos ( Skempton,1953).....	252
Tabla 6.5 Relación entre la Actividad de los suelos finos arcillosos y el contenido de minerales arcillosos .....	253
Tabla 6.6 Fórmulas para determinar el grado de colapso a partir de propiedades índice.....	254
Tabla 6.7 Clasificación de suelos expansivos basados en el índice de Plasticidad y el índice de contracción (Cano & Márquez, 2014).....	254
Tabla 6.8 Clasificación de colapsabilidad, actividad y grado de expansión de los suelos a partir de propiedades índice – Zona Piloto 1.....	257
Tabla 6.9 Clasificación de colapsabilidad, actividad y grado de expansión de los suelos a partir de propiedades índice – Zona Piloto 2.....	258
Tabla 6.10 Clasificación de colapsabilidad, actividad y grado de expansión de los suelos a partir de propiedades índice – Zona Piloto 3.....	259
Tabla 6.11 Análisis estadístico resultados ensayos de resistencia al corte condición UU y condición CD Zona Piloto 1 .....	264
Tabla 6.12 Análisis estadístico resultados ensayos de resistencia al corte condición UU y condición CD Zona Piloto 2 .....	264
Tabla 6.13 Análisis estadístico resultados ensayos de resistencia al corte condición UU y condición CD Zona Piloto 3 .....	265
Tabla 6.14 Parámetros modelo Cam Clay Y Mohr Coulomb.....	268
Tabla 6.15 Correlación entre Cr y Cc para las tres zonas piloto.....	269
Tabla 6.16 Correlación entre el Límite Líquido y el índice de Plasticidad para las tres zonas piloto .....	280
Tabla 6.17 Correlación entre el Índice de consistencia y el índice de Plasticidad para las tres zonas piloto .....	282
Tabla 6.18 Correlación entre el Coeficiente de Compresibilidad y el Límite Líquido para las tres zonas piloto .....	285
Tabla 6.19 Correlación entre el Sen $\Phi$ y el índice de Plasticidad para las tres zonas piloto .....	287
Tabla 6.20 Datos básicos del suelo tomados para modelación tres zonas piloto .....	299
Tabla 6.21 Datos relaciones de fase tomados para modelación tres zonas piloto.....	299
Tabla 6.22 Datos cohesión y fricción suelos tomados de ensayos de laboratorio y correlaciones tomados para modelación tres zonas piloto.....	299
Tabla 6.23 Módulos del suelo tomados para modelación tres zonas piloto .....	300
Tabla 6.24 datos variables tomados de ensayos de laboratorio para modelación tres zonas piloto.....	300
Tabla 6.25 variables finales tomadas de ensayos de laboratorio y depuración de información tomados para modelación tres zonas piloto.....	300
Tabla 6.26 Parámetros modelo Morh Coulomb zona piloto 1 – TAB1; superior M3 Y M4, inferior M7 Y M8.....	301
Tabla 6.27 Parámetros modelo Morh Coulomb zona piloto 2 – TEB- M6 Y M7 .....	301
Tabla 6.28 Parámetros modelo Morh Coulomb zona piloto 3 .....	302
Tabla 6.29 Parámetros modelo Cam Clay zona piloto 1 – TAB1; superior M3 Y M4, inferior M7 Y M8..	303
Tabla 6.30 Parámetros modelo Cam Clay zona piloto 2 – TEB 3; M6 Y M7 .....	304
Tabla 6.31 Parámetros modelo Cam Clay zona piloto 3 .....	304

Tabla 6.32 Parámetros modelo Duncan Shang zona piloto 1 – TAB1; superior M3 Y M4, inferior M7 Y M8.....	309
Tabla 6.33 Parámetros para la modelización PLAXIS.....	310
Tabla 6.34 Parámetros modelo Duncan Shang zona piloto 2 – TEB 3; M6 Y M7.....	310

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**



## 1 INTRODUCCIÓN

Es innegable que hablar de comportamiento geomecánico de materiales geológicos finos, especialmente materiales arcillosos, obliga entre otros aspectos a hacer referencia al medio geológico y ambiental que dio origen a los mismos y su evolución espacio temporal, que incluye no solo variables naturales físicas y químicas, sino variables antropogénicas propias de la acción del hombre sobre el medioambiente, sus interrelaciones y los resultados finales asociados al comportamientos de los materiales de superficie, que en muchos casos llevan a la generación de comportamientos anómalos para las estructuras que requiere el hombre para su desarrollo, tales como vías, viviendas, líneas vitales subterráneas, etc.

El fin primordial de los estudios geotécnicos, tal como lo establece Gens Solé (2005), es dar una respuesta eficaz que permita hallar la solución a los problemas geotécnicos encontrados al momento de desarrollar obras en un terreno atendiendo dos elementos fundamentales: tener un margen de seguridad frente a la posibilidad de falla del terreno y en segundo lugar asegurar que las deformaciones del terreno son lo suficientemente pequeñas para no afectar seriamente a las funciones de la estructura a desarrollar. En este sentido, es importante entender, que muchos materiales alcanzan deformaciones que pueden dañar estructuras sin que el suelo llegue a la falla o rotura, igualmente otros suelos pueden llegar a la falla o colapso bajo condiciones no críticas de cargas, etc., llevando este análisis, a que la determinación de causas del comportamiento de los suelos es de alta complejidad y se asocia no solo al momento actual, sino a la historia geológica de los materiales y su evolución, entendiéndose que todos los procesos geotécnicos son activos en el tiempo y el espacio.

En Colombia, la construcción de obras de infraestructura se desarrolla con base en la Norma Colombiana de Construcciones Sismo Resistentes, NSR-10, la cual dedica un capítulo especial, capítulo H, al análisis geotécnico para obras de infraestructura, análisis de deslizamientos, excavaciones y algunos comportamientos especiales asociados a la deformación y colapso de los suelos, así como análisis geotécnicos asociados a cargas dinámicas; sin embargo y siendo de alta importancia en materiales finos arcillosos el conocimiento de la microfábrica, que revela las propiedades químicas de los materiales, esta caracterización no se incluye normativamente. Igualmente, gran parte del desarrollo económico de las ciudades, no solo en Colombia sino en la mayor parte del mundo, se centra alrededor de zonas que se ubican por facilidad de acceso en zonas con morfologías onduladas a planas, zonas bajas en piedemonte

de cordilleras. En Colombia en gran parte de los casos, estas áreas presentan en superficie suelos o terrenos en donde predominan los materiales geotécnicos finos del tipo limo y arcilla, dada su mayor facilidad constructiva para las comunidades.

De otra parte, Colombia cuenta con mapas geológicos a diferentes escalas que permite conocer la distribución de materiales geológicos tipo suelo y roca en el territorio colombiano. El mapa geológico nacional contiene la información geológica disponible con diferentes versiones publicadas, la primera edición publicada en 2007; la segunda, en 2015; y la tercera publicada en 2020. Las unidades representadas en el mapa son unidades cronoestratigráficas y se agrupan de acuerdo con la edad y la litología de los materiales. Para la edad, este mapa utiliza como referencia la *Carta Cronoestratigráfica Internacional 2020*, para la división litológica se diferencian las rocas y los depósitos. Más allá de esta información el territorio colombiano cuenta con información de Unidades geológicas superficiales a escala 1:25.000 en algunos sectores de interés para el territorio colombiano que permite conocer en forma general los posibles materiales geológicos presentes en superficie diferenciando rocas de suelos y asociándolos a su comportamiento respecto su caracterización y posibles condiciones asociadas a obras de infraestructura.

Es de anotar, que en Colombia no se cuenta con mapas de Unidades geológicas superficiales - UGS (los más cercanos desde la geología al comportamiento geomecánico de los materiales) y mapas de zonificación geológico – geotécnica a escalas media y regional en las áreas con proyecciones de desarrollo, solo se tienen algunos estudios puntuales en algunos sectores del país. En la actualidad, los instrumentos de planificación territorial municipal exigen el desarrollo de estudios a escala media (1:25.000) con caracterizaciones cualitativas o semicuantitativas para las UGS.

Es, sin embargo, bien importante prestar especial atención al divorcio existente entre los análisis geotécnicos requeridos a nivel normativo (NSR-10 para Colombia) y los análisis geológicos requeridos y desarrollados para efectuar estudios geotécnicos, cuando estamos en una de las etapas más importantes del desarrollo de infraestructura: el diseño y construcción. Para la fase de diseño los análisis geológicos se vuelcan totalmente en una mera descripción de la geología local a nivel de datos, los cuales pueden servir más bien para estudios de zonificación, que como dato de la mayor relevancia para la caracterización geomecánica particular de los materiales, esto especialmente para materiales arcillosos para los cuales el comportamiento geomecánico está controlado más por las propiedades asociadas a la microfábrica que

a la macroestructura. En este sentido, es de anotar, que los estudios geotécnicos se direccionan a la caracterización de la macroestructura de los suelos y la identificación de estos primordialmente alrededor de un análisis textural y esfuerzo – deformación a partir de respuestas básicamente mecánicas, olvidando que muchas de las respuestas en materiales finos se asocian a la composición química de los materiales y su microfábrica.

En general, los estudios geotécnicos para el desarrollo de obras se direccionan en dos aspectos: el primero conocer las condiciones de fase relacionadas con propiedades básicas de los suelos tales como sensibilidad, colapsabilidad, expansión, dispersividad, desgaste, etc., a partir de correlaciones semiempíricas, propiedades que definen comportamientos especiales de los suelos y especialmente en los materiales arcillosos (Fredlund et al., 1995); y el segundo aspecto, conocer las características respecto de la resistencia y deformación de los materiales geológicos relacionadas con el estado de alteración (meteorización) de geo-materiales debido a la acción de factores medioambientales como precipitación, temperatura, viento, humedad relativa y acciones combinadas de estos factores, tales como erosión, sobrecarga, etc.

En el segundo tema la investigación se ha direccionado a tan solo algunos aspectos de composición, referidos al componente químico y algunas variables físicas, debido precisamente a la dificultad de escalar tanto factores ambientales como la reacción esperada de los materiales (Tristancho & Caicedo, 2008). Es importante tener en cuenta que los aspectos químicos de los suelos no son obligatorios ni usados específicamente para el diseño de obras, dando como resultado fallos y pérdidas importantes a nivel físico de obras de infraestructura y social de las comunidades afectadas.

## **1.1 Antecedentes y objetivos**

Los materiales predominantemente arcillosos, pueden presentar comportamientos muy diferentes ante sollicitaciones semejantes dependiendo de su ambiente de formación y evolución, de lo cual tenemos ejemplos muy importantes en Suramérica y específicamente en Colombia, tal como se ha descrito previamente. Puede verse este hecho reflejado en comportamientos especiales y deterioros de urbanizaciones en áreas ocupadas por materiales arcillosos de orígenes diferentes por ejemplo en Barranquilla (Atlántico), donde se encontraron materiales que exhiben comportamientos de expansividad (Rodríguez, 2014) colapso, dispersividad y sensibilidad (Torres, 2011); en la Sabana de Bogotá, capital de

Colombia, en el sector noroccidental en donde se presentan agrietamientos, hundimientos y daños en vías (G. E. Ávila, 2004; Caicedo et al., 2003), en el eje cafetero en el departamento del Quindío en donde cortes en arcilla a fuertes pendientes presentan buena estabilidad y prácticamente nula deformación. (Calderón & Ruiz Taborda, 2004) Se tienen en el primer caso arcillas de origen marino, en el segundo depósitos lacustres, y en el último caso depósitos de origen volcánico. Los tres presentan una caracterización textural a nivel geotécnico muy similar y se clasifican como materiales arcillosos o limo arcillosos, pero han sido influenciados por ambientes climáticos que han evolucionado en forma distinta y por lo tanto han generado un comportamiento de los materiales que difiere en lo relativo a esfuerzos y deformaciones, producto de su origen geológico.

Es importante anotar que la degradación de los materiales finos arcillosos en zonas tropicales suele ser mucho más acelerada que en otras latitudes, operando más en tiempo ingenieril que en tiempo geológico (González et al., 2002). Esta degradación está asociada primordialmente a pérdida o modificación en la fábrica (aspectos micro estructurales) y estructura de los materiales o pérdida de cementante que ocasiona cambios volumétricos, pérdida en algunos casos de masa y movilización de la resistencia al corte; sin embargo, también las experiencias previas y evaluaciones empíricas, han demostrado que la degradación de los suelos está estrechamente relacionada con cambios en el potencial total del agua (relacionado con aspectos ambientales y climáticos propios de cada región) que puede ingresar al suelo, un aspecto que no ha sido estudiado de modo sistemático. Es importante anotar que la degradación física - química de los materiales geológicos y específicamente de los materiales arcillosos se puede interpretar a la luz de fenómenos hidro - químicos y físico-mecánicos en donde el agua, la fábrica de los materiales y los elementos hidroclimáticos que afectan el territorio son las principales variables de control, (Calderón & Ruiz Taborda, 2004).

En este sentido, la literatura reciente ha enfocado sus esfuerzos en el estudio de los suelos arcillosos principalmente en los casos asociados a agrietamiento y retracción de suelos arcillosos, los cuales pueden estar asociados a periodos prolongados de sequía, explotación de agua subterránea, entre otros, y en muchos de los casos afectan obras civiles que se apoyan sobre ellos, llevándolas, en algunos de los casos al colapso. En general, la presencia de estos materiales en laderas se asocia a la inestabilidad de éstas, producto del ingreso de agua por las grietas o zonas de debilidad por donde se infiltra el agua, reduciendo la resistencia al corte de los materiales (Borja & Lee, 1990; Lambe & Whitman, 1979).

Se tienen ejemplos de comportamientos especiales de suelos predominantemente arcillosos en diferentes zonas de América, por ejemplo en varios sectores de México como la ciudad de Aguas Calientes (Aranda, 1991), Queretano (Trejo & Martínez, 1991) y Ciudad de México (Murillo et al., 1991) en donde se reportan casos de agrietamiento severo de suelos arcillosos; al igual se tienen casos importantes reportados en la literatura como los agrietamientos de la arcilla de Londres (Costa-Filho, 1984; Skempton et al., 1969) y patrones de grietas en el suroeste de Inglaterra (Fookes & Denness, 1969).

Igualmente, los procesos de alteración y meteorización de las rocas que han dado lugar a dichos materiales y que en gran parte de los casos se encuentran en proceso y siguen operando en superficie, (siendo en gran parte los responsables de dichos comportamientos) no se encuentran claramente establecidos a nivel de los materiales de superficie, tanto en rocas como en suelos y depósitos, ejemplos de investigaciones del comportamientos de materiales arcillosos que involucran el análisis de factores endógenos y exógenos de formación de los materiales geológicos, se presentan en estudios desarrollados en rocas lodosas en los Andes Colombianos (Torres, 2011).

La aparición de agrietamientos en diferentes sectores en la ciudad de Bogotá en Colombia está referida por diferentes autores tanto en la zona rural como urbana (G. E. Ávila, 2004; Calderón & Ruiz Taborda, 2004), agrietamientos que han afectado tanto infraestructura vial como viviendas. Igualmente, se han presentado deformaciones del suelo y subsidencia en zonas urbanas con presencia de árboles de gran tamaño, tal como también se muestra en la literatura en otros sectores del mundo (Driscoll, 1983; Holtz, 1983; Richards et al., 1983).

En varios casos ocurridos en Colombia se tienen ejemplos claros de esta problemática. Uno de los casos que se tienen datados y se ha venido presentando, se ubica en el sector noroccidental de la Sabana de Bogotá en el centro de Colombia y cerca de la capital del país (Bogotá) en terrenos de origen lacustre y fluvio lacustre, en algunas zonas de la denominada Sabana de Bogotá; en esta zona se ha logrado identificar una profundidad del depósito lacustre que puede alcanzar los 600 metros (Chacón, 2004), estos materiales han venido siendo modelados elástica y elastoplásticamente, sin embargo, los resultados de los modelos no generan datos satisfactorios respecto de las deformaciones que se presentan en la realidad.

Ávila (2004) relata la aparición de grietas superficiales desde hace más de 15 años al noroccidente de la capital, en zonas geológicas con predominio de suelos arcillosos, en área predominantemente rural y con explotación de aguas subterráneas; estas grietas han afectado obras lineales importantes como vías y han generado daños ambientales de altísima importancia. Igualmente la zona urbana de Bogotá ha sido afectada, aunque con menor intensidad, por agrietamientos en vías y viviendas y se han detectado reducciones de presión hidrostática de más de 20 metros en los últimos 8 años en la zona de Sabana (G. E. Ávila, 1998, 2003). Es importante anotar que los estudios que se han desarrollado para los materiales finos arcillosos en Sabana de Bogotá se han direccionado a fenómenos de subsidencia y deformaciones superficiales, sin entrar en profundizar en otros fenómenos importantes tales como el creep, la viscosidad y la relajación que se presentan en muchos de estos materiales y que al afectar zonas rurales, hoy desprovistas de obras de infraestructura se ha descuidado su análisis específico.

Estudios más recientes en Sabana de Bogotá, desarrollados específicamente para la ciudad de Bogotá, se enfocan en la generación de un modelo de caracterización y parametrización de los suelos blandos de Bogotá, mediante investigaciones de campo y ensayos de laboratorio efectuados entre los años 1996 y 1997 para el Estudio de Zonificación de la ciudad de Bogotá, basados en el modelo francés y modelos constitutivos aplicables al comportamiento de suelos blandos, como Cam Clay e hipoviscoplasticidad (Raba Moyano & Caicedo, 2012).

Igualmente, estudios recientes efectuados para el desarrollo del metro, específicamente en la ciudad de Bogotá, financiado por la FINANCIERA DE DESARROLLO NACIONAL – FDN en el año 2021, efectuados a partir de análisis de información secundaria, muestran que en las arcillas superficiales en los sectores de estudio en Bogotá, la resistencia decrece con la profundidad y se observan materiales altamente deformables con índices de compresibilidad entre 1 y 2 y con relaciones de sobreconsolidación RSC superior a 4, hasta aproximadamente los 8 metros, y bajando a RSC entre 1 y 2 después de los 8 metros. De acuerdo con los resultados de estos estudios iniciales, *“la reducción de humedad por efecto de cambios climáticos globales o como resultado del fenómeno de “isla caliente” son evidentes en la Sabana de Bogotá y a lo largo del corredor. Esto es, la pérdida de humedad y descenso del nivel freático pueden provocar asentamientos locales y fuertes contracciones, con lo cual aparecerían agrietamientos severos”*, fenómeno altamente observable en el occidente de la Sabana de Bogotá y el río Bogotá. (EGIS STEER, 2021).

En otro sector del país, con materiales superficiales geotécnicamente similares, es decir con predominio de suelos finos arcillosos, pero de origen volcánico, en sectores dispersos en los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda, se han observado comportamientos que difieren en forma importante respecto del comportamiento geomecánico de los materiales arcillosos de Sabana de Bogotá. Específicamente, en el departamento del Quindío, estudios desarrollados posteriores al terremoto que devastó la ciudad de Armenia, capital del departamento de Quindío, en el año 1999, se indica que se encontraron pocas fallas de laderas naturales, "salvo en la zona epicentral (INGEOMINAS, 1999; Parra & Mejía, 1999) varias fallas superficiales en cortes viales, y no se encontró evidencia de fallas del suelo de las cimentaciones. Es decir, que geotécnicamente las cenizas volcánicas se comportaron muy bien durante el sismo..." (INGEOMINAS, 1999). En este estudio y otros desarrollados sobre materiales de origen similar, se ha demostrado que los suelos arcillosos producto de cenizas volcánicas en estas zonas del país, pertenecen a una clase especial denominada "alofánica", mencionados por Maeda (Maeda et al., 1977) como un término amplio que incluye los suelos derivados de la meteorización de piroclastos.

En materiales del mismo origen, estudios desarrollados en un sector urbano, barrio Galicia, en la capital del departamento de Risaralda en Colombia, departamento que limita con Quindío (Pinzón Bonilla & Garzón García, 2018), mostró que los materiales arcillo limosos de superficie producto de cenizas volcánicas presentaban un índice de colapso muy alto (Redolfi, 2007) mayor del 20%, una baja sensibilidad y una alta compresibilidad. Este comportamiento podría ser explicado para algunos autores a partir de la existencia de materiales alofánicos, tal como lo expresa Maeda (1977), indicando que los cambios de humedad en estos materiales los lleva a comportamientos especiales que hacen que un suelo alofánico seco se pueda considerar como otro material.

En casos similares, Forero-Dueñas (1998), observó que el comportamiento mecánico de los geles amorfos de sílice, que puede ser adoptado para las alófanos, se veía muy afectado por los cambios ambientales, incluyendo temperatura y humedad relativa. En este modelo de comportamiento, se conocen tanto la estructura del material, como los cambios en la resistencia debidos a un fenómeno ambiental, como es el caso de la desecación; este modelo, podría explicar los fenómenos observados "in situ" del comportamiento de las cenizas volcánicas en ciertos rangos de humedad natural, "las cuales se comportan muy bien en cierto rango de humedad natural, pero cuando se resecan se agrietan y disgregan, de manera que la coherencia y continuidad de la estructura se pierde. Tal puede ser el caso de los taludes, los cuales luego de agrietarse y ante un aguacero, fallan. Igualmente, en el caso del terremoto, al parecer

*las aceleraciones sísmicas no fueron capaces de romper los enlaces químicos de siloxano de la estructura de las cenizas; de esta manera, a partir de una experiencia investigativa de laboratorio, se pudiera sugerir una explicación estructural al comportamiento real de las cenizas volcánicas” (INGEOMINAS, 1999).*

Un tercer caso de importancia que muestra las afectaciones especiales que los suelos predominantemente arcillosos pueden tener, en su relación con obras de infraestructura, es el que se presenta en la costa Caribe en Colombia. En algunas zonas del país, bajo ciertas condiciones ambientales (climas áridos y semiáridos) típicas en varias zonas del territorio, especialmente en las zonas costeras o cercanas a la costa, se presentan comportamientos especiales de los suelos arcillosos; tal es el caso del distrito de Barranquilla situado en la región caribe al norte del país, en donde el problema de movimientos diferenciales de estructuras y deslizamientos posiblemente asociados con cambios volumétricos en arcillas de origen marino, ha generado grandes pérdidas económicas.

Los procesos son severos especialmente en las laderas occidentales de la ciudad de Barranquilla, cuyo acelerado proceso de crecimiento urbano completa más de tres décadas Arrieta (2005), y en donde asociado al fuerte régimen de lluvias presentado en 2010 – 2011, se habían registrado hasta el año 2011, cerca de 33 procesos de inestabilidad afectando importantes áreas habitadas (INGEOMINAS, 2011). En este caso, la práctica geotécnica más exhaustiva ha estado dirigida a la caracterización y evaluación de la resistencia al corte de estos materiales, como posible solución a los problemas de inestabilidad de laderas presentados. Aunque se dispone de un número considerable de trabajos sobre el comportamiento geotécnico de estos materiales, el campo de investigación aún está abierto en diversos aspectos fundamentales (Rodríguez, 2014).

Un aspecto muy importante, con el fin de definir probables comportamientos esfuerzo – deformación de los suelos, es el contar con modelos constitutivos que permitan establecer los posibles comportamientos geotécnicos especiales de suelos predominantemente arcillosos en zonas de alta complejidad geológica y geomorfológica como es el caso colombiano, aspecto de suma importancia con fines de planificación del territorio y diseño de obras de infraestructura. La relación esfuerzo - deformación de los materiales finos arcillosos, es evaluada desde la geotecnia a partir de modelos de comportamiento mecánico del material, comportamiento que dependerá en gran parte de las propiedades granulométricas del material, por lo tanto, es no lineal y es irreversible, siendo los esfuerzos efectivos los que controlan el comportamiento mecánico del suelo (Nieto Leal, 2007). A partir de los tipos



básicos de comportamiento mecánico esfuerzo deformación de los suelos: el elástico, el plástico, el viscoso y sus combinaciones, se han desarrollado modelos de comportamiento elástico, hipoplástico (Herle & Kolymbas, 2004; Kolymbas, 2000; Kolymbas et al., 1995), y visco-hipoplástico que tratan de explicar las relaciones entre las diversas variables mecánicas que controlan este comportamiento, los dos últimos modelos son los más aplicables a las arcillas finas. Es importante anotar que a medida que se desarrollan nuevos modelos la complejidad para su uso y aplicación es mayor, lo cual dificulta que se pueda generar una práctica común que permita generalizar su aplicación.

Gran parte de estos fenómenos se han estudiado a la luz de modelos de agrietamiento por desecación (G. E. Ávila, 2003; Konrad & Ayad, 1997; Morris et al., 1992) que incluyen el análisis de la deformabilidad ante los cambios de succión, la resistencia a la tracción y parámetros de mecánica de fractura (G. Ávila et al., 2002; G. E. Ávila, 2003; Konrad & Ayad, 1997; Lee et al., 1988; Morris et al., 1992); el tema de la resistencia a la tracción requiere mayores niveles de investigación y conocimiento de parámetros producto de investigación de laboratorio. Los temas de los parámetros de mecánica de fractura han sido investigados por diferentes autores (G. E. Ávila, 2003) y ya se tienen avances importantes al respecto.

Uno de los aspectos ampliamente estudiados es el comportamiento de las arcillas expansivas químicamente activas, el cual se ha formulado dentro del marco general formulado por Gens y Alonso (1992) para el comportamiento mecánico de arcillas expansivas no saturadas “Barcelona Expansive Model – BM x E); este modelo es apropiado para la consideración de las variables geoquímicas y sus efectos se introducen en el comportamiento de la microestructura donde se encuentran los minerales químicamente activos. Este modelo, se basa en trabajos previos efectuados por Salas & Serratosa (1953), al que siguió el trabajo de Bolt (1956) quien demostró que el cambio en la concentración de sal en el agua que se encuentra en los poros de las arcillas modifica su compresibilidad; trabajos posteriores demostraron que la resistencia al corte de las arcillas presentaba cambios importantes respecto de la composición del agua de poros como se observa en los estudios desarrollados por (I. D. Moore et al., 1991; Olson & Mesri, 1970; Sridharan et al., 1986)

En general los modelos más ampliamente usados en la interpretación del comportamiento mecánico de arcillas expansivas a nivel interparticular, son los modelos basados en la teoría de la capa doble difusa expuesto por Gouy y Chapman (Bolt, 1955). Desde el punto de vista matemático estos

modelos se basan en la determinación del potencial eléctrico en el punto central de dos partículas de arcilla paralelas bajo determinadas condiciones físico – químicas; otros autores han incluido nuevos factores en el modelo que permiten su complementación y mejora tales como (Bache, 1990; Kamine & Ogata, 1995) entre otros.

El uso de bentonitas como elemento aislante en barreras de residuos radiactivos impulsó el desarrollo de estudios del comportamiento de los materiales arcillosos sometidos a acciones químicas, tal como se observa en (Barbour & Yang, 1993); igualmente (Di Maio et al., 2004), quienes estudiaron el comportamiento de arcillas expansivas expuestas en forma sucesiva a diferentes tipos de sales. Otros estudios han encontrado anomalías en el comportamiento de las arcillas ante la exposición a diferentes elementos como calcio y potasio.(Guimarães, 2002; Mitchell, 1993; Salas & Serratosa, 1953; Sridharan et al., 1986)

Finalmente Guimarães (2002) propone un modelo de comportamiento basado en el THM (transporte conservativo con formulaciones) del suelo, originando una formulación acoplada termo-hidro-mecánica y geoquímica (THMC), modelo denominado BE x CM, el cual se basa en el modelo BE x M y es un modelo elastoplástico de comportamiento para suelos expansivos que incluye tres elementos básicos: comportamiento para la microestructura, comportamiento para la macroestructura y acoplamiento entre macro y microestructura.

Dadas estas consideraciones iniciales, y bajo el conocimiento del ejercicio del análisis geotécnico bajo la normatividad actual en países como Colombia, de alta complejidad geológica, geomorfológica y geotécnica, normativa producto de economías emergentes y en desarrollo, que requieren el desarrollo acelerado de obras de infraestructura tanto vertical como lineal, la pregunta que motiva esta investigación se plantea en la siguiente forma: ¿Cómo se pueden establecer patrones de relación causal de comportamientos geotécnicos especiales en suelos finos predominantemente arcillosos respecto de su génesis , evolución y comportamiento geomecánico esfuerzo-deformación, que puedan ser predecibles, con la aplicación de algunos modelos constitutivos en tres zonas piloto de origen geológico bien diferenciado en Colombia, patrones que permitan complementar los requisitos normativos para el desarrollo de obras de infraestructura lineales y no lineales en Colombia?

Para responder a esta pregunta, se hace necesario un análisis semicuantitativo integrado de información geológica, geomorfológica y geotécnica, así como modelos matemáticos constitutivos desarrollados para materiales finos arcillosos a partir de información secundaria y primaria experimental, en sectores preseleccionados. Estas zonas requieren la existencia de suelos, cuyo comportamiento geomecánico pueda ser comparado con base en datos de campo y criterios técnicos establecidos con bases científicas dentro de esta investigación. Para este caso se seleccionaron tres zonas, dados los antecedentes que se han descrito, en donde se minimiza, con un adecuado tratamiento de los datos, la subjetividad en el análisis. Estas zonas son: 1. Sabana de Bogotá, 2. Quindío y 3. El municipio de Barranquilla en Colombia,

## **1.2 Objetivos**

Con base en los argumentos precedentes, se estableció como objetivo último de esta tesis doctoral, analizar la existencia de relaciones causales entre el comportamiento esfuerzo – deformación de suelos predominantemente arcillosos, con su origen y ambiente de formación, en tres zonas piloto en Colombia, a partir de la evaluación y análisis de diferentes variables geológicas, geomorfológicas y geotécnicas, producto de: información existente y primaria de campo, análisis de laboratorio macroestructural y microestructural y verificación prospectiva de su validez en algunos modelos constitutivos aplicables para estos materiales.

Es importante anotar que, el alcance de este trabajo de investigación no corresponde a efectuar una zonificación geológico – geotécnica en las zonas piloto estudiadas; tampoco se pretende efectuar estudios geológicos y geomorfológicos que modifiquen o planteen nuevos aspectos del conocimiento geológico existente en las zonas en evaluación, sino más bien, pretende el uso del conocimiento actual en estas temáticas, como base para explicar el comportamiento geotécnico de los suelos, conocimiento que pueda ser incorporado desde los estudios de planificación de los territorios en Colombia, además de la normativa existente, a mediano y corto plazo.

A partir de este objetivo principal, los objetivos específicos son:

- Establecer correlaciones de las constantes de suelo, que determinan comportamientos especiales en resistencia y deformación, con sus propiedades índice y su variación para suelos

predominantemente arcillosos, en tres zonas piloto en Colombia de diferente origen geológico.

- Proponer y desarrollar modelos geológico – geomorfológicos por zona piloto, como base para el análisis del comportamiento geomecánico de los suelos finos predominantemente arcillosos, con el fin de identificar zonas geotécnicas homogéneas desde la escala regional hasta la escala local para las tres zonas definidas, con fines comparativos.
- Establecer el comportamiento esfuerzo – deformación de los materiales por zona piloto, desarrollando un análisis comparativo de los resultados y aplicable a los modelos constitutivos a usar, a partir de datos físicos y químicos, a lo largo de los perfiles estratigráficos propuestos, con el fin de determinar la aplicabilidad de los resultados en análisis prospectivos dados por los modelos.

### **1.3 Contenido de la Tesis**

La tesis doctoral está estructurada en siete capítulos:

Capítulo 1: El capítulo 1 contiene la introducción general, antecedentes, objetivos y estructura del trabajo; se presenta el objetivo general y los específicos del trabajo de investigación, alcances y metodología del trabajo.

Capítulo 2: En el capítulo 2 se presenta la localización de las zonas piloto propuestas y el encuadre geológico - geomorfológico a nivel regional.

Capítulo 3: Este capítulo se enfoca en la metodología propuesta y las herramientas técnicas utilizadas para el desarrollo de las diferentes actividades que se enmarcan en el proceso de investigación.

Capítulo 4: Se presenta el estado del arte alrededor de los tópicos de mayor interés para el desarrollo de este trabajo, tales como ambientes de formación de los suelos arcillosos, análisis macro y microestructurales de importancia para el análisis esfuerzo – deformación y aplicables a diferentes

modelos constitutivos. Igualmente se presentan los antecedentes de evidencias de comportamientos especiales en suelos finos ocurridos en las zonas piloto en estudio.

Capítulo 5: Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación metodológica, tanto a nivel de modelos como de datos.

Capítulo 6: Con base en los resultados obtenidos para las tres zonas piloto, se presenta el análisis de resultados a partir de aplicación de herramientas estadísticas y modelación geotécnica, así como la discusión de los resultados.

Capítulo 7: Se presentan las conclusiones del trabajo y nuevas líneas de investigación a partir de los resultados obtenidos.

**CAPITULO 2**  
**LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE GEOLÓGICO**  
**DE ZONAS PILOTO**

## 2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE GEOLÓGICO – GEOMORFOLÓGICO

### 2.1 Marco geográfico de las zonas de estudio

El territorio colombiano se encuentra situado en el borde noroccidental de la placa suramericana. Colombia, actualmente en la esquina noroccidental del continente suramericano, limita al norte con el mar Caribe, al oriente con Venezuela, cuyo territorio se extiende hacia el sur hasta el río Negro, uno de los cauces del Amazonas; al suroriente limita con Brasil y al sur con Perú y Ecuador. Al occidente, su límite es el océano Pacífico y la República de Panamá; tiene una interesante evolución a lo largo de más de los 1780 millones de años datados, causante de la distribución de los diferentes tipos de rocas y la conformación topográfica que hoy se observa (Loboguerrero, 1987); una diferencia fisiográfica fundamental en el territorio colombiano es la existencia de muy poco relieve en la parte oriental del territorio, frente a las cordilleras andinas que se observan en la parte occidental del territorio colombiano.

Colombia es un país montañoso, cuyo clima está ligado a las alturas y éstas varían desde el nivel del mar hasta 16.000 pies de altura, por lo que se encuentran todas las variedades de condiciones climáticas. Es justamente esta diferencia en el clima la que impacta el desarrollo del país y aunque Colombia está situada en los trópicos, en cuanto se refiere a la latitud, no es de ninguna manera en su totalidad un país tropical, pues las alturas de las montañas del interior generan muchos cambios en el clima.

Tal como lo expresa el mismo Lobo Guerrero: *“El país está excepcionalmente bien situado sobre el globo terrestre; medio país yace bajo mares tropicales y ecuatoriales; el otro medio es continente. Está algo mejor conocido. En parte está formado por rocas antiquísimas, el Escudo Precámbrico de la región oriental del país y en parte por rocas jóvenes, la Cordillera de los Andes. Como resultado tenemos una variada y compleja geología con muchísimos recursos minerales, más que abundante agua y numerosas fuentes de energía (solar, nuclear, geotérmica, fósil, hídrica y vegetal). Es decir, todo; para seguir construyendo nuestra cultura y desarrollando nuestra propia sociedad por nuestros propios medios”*(Loboguerrero, 1987); esta condición nos permite encontrar dentro del mismo territorio materiales geotécnicos finos en superficie, denominados a nivel de la ingeniería civil como arcillas y limos, con diversos orígenes y evolución. Debido a estas características en el territorio se logró obtener tres zonas en las cuales encontramos estos “materiales geológicos finos” con génesis diferente y sobre los

cuales podemos establecer mediante un proceso riguroso de selección, una comparabilidad respecto de su comportamiento geomecánico ante la acción natural y humana.

Una selección adecuada de las áreas de estudio permitirá que se pueda establecer o no la comparación de las variables que definen el comportamiento geotécnico de un material geológico, en este caso las arcillas o suelos finos predominantemente arcillosos, respecto de su respuesta en resistencia y deformación, frente a sus características endógenas definidas por su origen y evolución, y los factores exógenos que han afectado su comportamiento geomecánico. El proceso de selección de las zonas piloto obedece a un análisis deductivo, tal como se presenta esquemáticamente en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Acercamiento metodológico para selección de puntos de exploración primaria (fuente propia)

La hipótesis de partida que se ha tomado para esta investigación propone cómo la variable de enlace entre los diversos componentes que dan lugar a la formación y caracterización de los materiales de superficie a la geomorfología, la cual explica en forma integral como los diversos factores de formación



de los materiales, desde su génesis hasta el ambiente de formación y evolución de estos. La conjugación de las variables morfoestructurales, geotectónicas y geoclimatológicas definen el grado de movilidad al cual están sometidos los diferentes paisajes.

Teniendo en cuenta lo descrito previamente, se tomaron cinco criterios técnicos básicos para la selección de las zonas de estudio:

1. Características fisiográficas que permitan establecer unos parámetros iniciales de comparabilidad para el análisis que se plantea. Estas características se resumen en la siguiente forma:
  - Zonas con topografía predominantemente ondulada a plana. En este sentido se definieron áreas con topografía de pendientes muy bajas (entre 0 y 10°), pero con variaciones importantes en altitud: la zona andina en donde se ubica la Sabana de Bogotá y Quindío con altitudes que oscilan entre 1700 a 2600 msnm y la costa caribe con altitudes entre 0 y 130 msnm. Igualmente, de preferencia se seleccionaron zonas en áreas rurales o suburbanas sin existencia de construcciones, dado que se tendrá menor perturbación de los materiales, esto no se pudo obtener totalmente para la zona de Barranquilla, sin embargo, dadas las bajas cargas en las zonas de estudio este requerimiento se da por cumplido.
  - Presencia en superficie (primeros 30 metros) de materiales geológicos predominantemente arcillosos o arcillo limosos comprobable con información previa existente.
2. Origen de los materiales, compuesto por los siguientes aspectos:
  - Ambiente morfogenético: para el caso de estudio se evalúan materiales arcillosos asociados a tres ambientes morfogenéticos (INGEOMINAS, 2002): AMBIENTE VOLCANICO (Verstappen & Zuidam, 1992); AMBIENTE MARINO PROFUNDO Y COSTERO, AMBIENTE FLUVIAL Y LACUSTRE.

- Geoclimatología: para tener en cuenta esta variable se incluyeron dos aspectos de especial importancia: se incluyen características asociadas a la topografía ya descrita e identificación de regiones morfogenéticas asociadas a una “Región Climática” (Eslava, 1993; Peltier, 1973; Thornbury, 1960) Con base en lo indicado y en la clasificación climática para Colombia de LANG y THORNTWAITE (IGAC, 1997), se plantea tomar puntos en las siguientes zonas climáticas: Cálida (costa Caribe), media (departamento de Quindío) y fría (Sabana de Bogotá).
3. Existencia de información geológica, geomorfológica y geotécnica secundaria en zonas en las cuales se haya identificado la existencia de materiales arcillosos en superficie.
  4. Existencia en superficie (primeros treinta metros) suelos arcillosos o arcillo limosos en las zonas con la génesis establecida previamente (tipo CH, CL, ML, de acuerdo con la clasificación Unified Soil Classification System (USCS).
  5. Posibilidad de obtener muestras producto de exploración directa para desarrollo de ensayos de laboratorio complementarios, muestras que se obtuvieron a partir de los trabajos que ha venido desarrollando el Servicio Geológico Colombiano entre el año 2019 y el año 2021. El Laboratorio Químico del SGC, permitió el uso del registro completo de algunas de las perforaciones desarrolladas en los puntos de interés para este trabajo de investigación, además de algunos de los materiales obtenidos en dichas actividades, materiales a los cuales se les desarrollaron análisis de laboratorio especiales y propios de la investigación que se desarrolla en este trabajo doctoral, conservando en todo caso la identificación de áreas que cumplan con los requisitos técnicos definidos en la Tabla 2.1 como mínimo.

Con base en lo descrito, se parte de una identificación preliminar de las áreas de estudio en escalas medias (entre 1:10.000 a 1:25.000) para alcanzar finalmente escalas locales y puntuales para identificar puntos de exploración geotécnica. Se describe enseguida brevemente la localización geográfica generalizada de las tres zonas piloto tomadas para la realización de este estudio. En la Figura 2.2 se presenta la localización de las zonas piloto en evaluación en esta investigación; la ubicación detallada de los polígonos con base en los criterios y metodologías establecidos se presenta en el capítulo 5 de resultados.

Tabla 2.1  
Áreas a Escala Regional Seleccionadas para el Estudio.

GEOCLIMATOLOGÍA				
AMBIENTE MORFOGENÉTICO	TOPOGRAFÍA		REGIÓN CLIMÁTICA	ÁREA SELECCIONADA
	Altitud (msnm)	Pendiente (°)	Caldas Modificado	
Fluvial y lacustre	2300 - 2700		Fría	Sabana de Bogotá (Departamento de Cundinamarca).
Volcánico	1700 - 2100	0 y 10	Medía	Municipios al noroccidente del departamento de Quindío
Marino, Profundo y Costero	0 - 130		Cálida	Municipio de Barranquilla (Departamento de Atlántico)

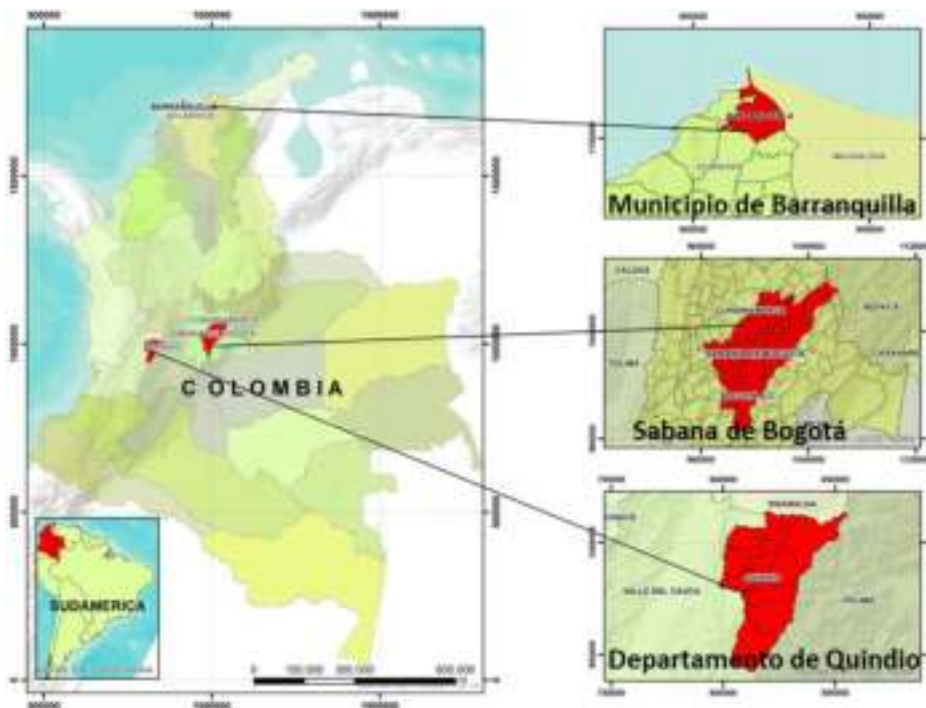


Figura 2.2 Localización de las zonas de estudio para el desarrollo de esta investigación.

### 2.1.1 Sabana de Bogotá

La sabana de Bogotá es una extensión de tierra plana en el altiplano, situado en la parte centro-oriental del país, justo al lado occidental de la cordillera Oriental de los Andes. La Sabana de Bogotá está ubicada sobre la Cordillera Oriental en el departamento de Cundinamarca en el centro del territorio colombiano, en la parte sur de los valles valandinos que caracterizan el altiplano Cundiboyacense, a una altura aprox., de 2.600 msnm; definida como la altiplanicie más extensa de los Andes Colombianos; se ubica en esta extensa zona la capital de Colombia, la ciudad de Bogotá, limita con el cerro de Suba al Oeste, los cerros de Guadalupe y Monserrate al Este, el Páramo de Sumapaz-Cerros de Nazaret y el Municipio de Soacha por el Sur y al Norte con el Municipio de Chía; tiene una extensión aproximada de 2500 km<sup>2</sup>, es decir unas 250.000 Has, administrativamente tiene 32 municipios tal como se muestra en la Figura 2.3

La temperatura media para la ciudad de Bogotá presenta valores con poca variación durante el año. La media anual oscila entre 12 y 15°C para el área urbana de la ciudad, con elevaciones entre 2500 y 2800 msnm. La temperatura media en general presenta tendencias de carácter creciente y tiende a ser de mayor magnitud por el efecto de la urbanización, la industria y otras actividades del hombre.



Figura 2.3 Localización Sabana de Bogotá y división administrativa. (Fuente: Tomado y modificado de IGAC; tomado de [omoscundinamarca.weebly.com/la-sabana-de-bogotaacute.html](http://omoscundinamarca.weebly.com/la-sabana-de-bogotaacute.html))



*Figura 2.4 Localización de Bogotá, en la parte Sur de la Sabana. Fuente: Tomado y modificado del Google Earth (2017).*

### **2.1.2 Departamento del Quindío**

El departamento del Quindío está ubicado en la parte centro occidental del país, localizado entre los 04° 04' 41" y 04° 43' 18" de latitud norte y entre los 75° 23' 41" y 75° 53' 56" de longitud oeste. Tiene una extensión de 1.845 km<sup>2</sup>, y limita por el norte, con los departamentos del Valle del Cauca y Risaralda; por el este, con el departamento del Tolima; por el sur con los departamentos del Tolima y del Valle del Cauca; y por el oeste, con el departamento del Valle del Cauca.

Predominan dos tipos de relieves: el primero, montañoso, está ubicado en el oriente; y el segundo, ondulado, en el occidente. El montañoso corresponde al flanco occidental de la cordillera Central, el cual se extiende en dirección sur - norte, con pendientes abruptas, muy relacionadas con la litología, en su mayoría rocas metamórficas. El segundo, corresponde al área cubierta de flujos de lodos volcánicos transportados por los ríos; el modelado es suave, de colinas bajas; esta última zona es el objetivo de este trabajo. El departamento del Quindío está conformado por 12 municipios: Armenia en donde se ubica la capital del departamento, Buenavista, Calarcá, Circasia, Córdoba, Filandia, Génova, La Tebaida, Montenegro, Pijao, Quimbaya y Salento. La zona de interés para este estudio se localiza en el sector centro occidental del departamento, es decir, comprende gran parte de los municipios de Armenia,

Tebaida, Montenegro y Quimbaya, dadas sus características fisiográficas asociadas a zonas planas y onduladas con presencia de materiales de origen volcánico de tipo arcilla y limo.

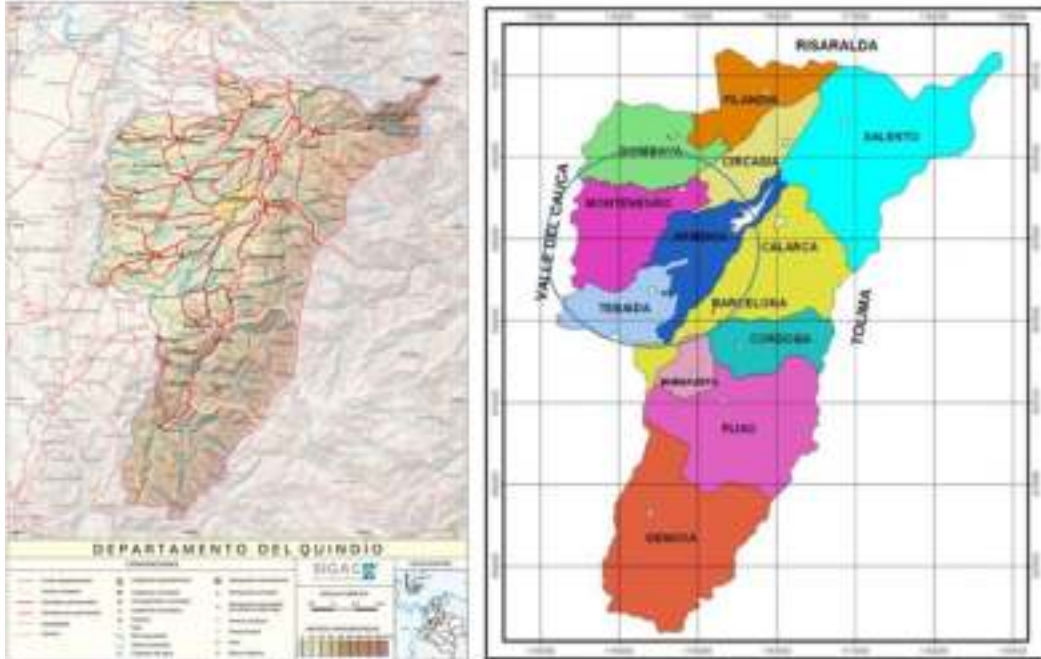


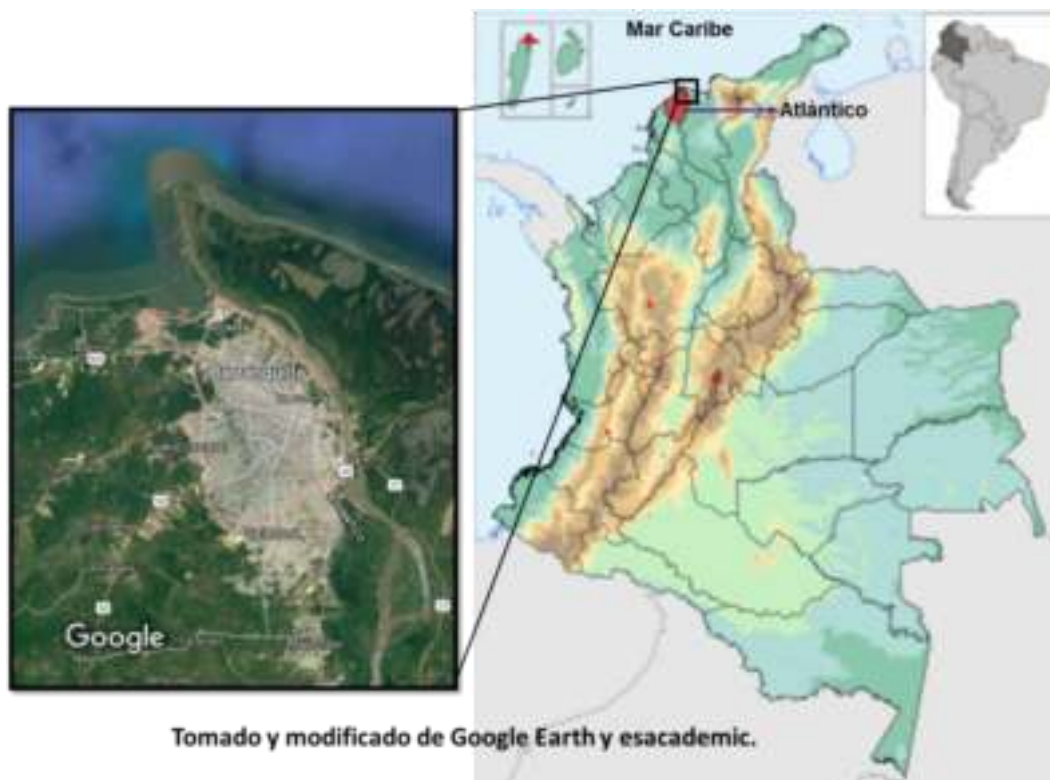
Figura 2.5 Localización Departamento del Quindío y división administrativa. (Fuente: Tomado y modificado de IGAC tomado de <https://jorivanmr.wordpress.com/>)

Debido a su posición geográfica, el Departamento del Quindío tiene un clima ecuatorial, donde la principal característica es la escasa variación de los valores de la temperatura media a través del año. La variabilidad de esta característica del clima es mayormente espacial, asociado, en gran medida, a la altura sobre el nivel del mar, encontrando las zonas más cálidas en sitios de menor altura y las más frías en las partes altas de la montaña

### 2.1.3 Municipio de Barranquilla

Barranquilla es la capital del Departamento del Atlántico en Colombia, puerto sobre el mar Caribe y denominada como la “Arenosa” se ubica en la margen izquierda del río de la Magdalena, a 7.5 km de su desembocadura al mar Caribe. Tiene una extensión de 154 km<sup>2</sup>, Figura 2.6.





*Figura 2.6 Localización de Barranquilla -capital del Departamento del Atlántico.*

Barranquilla se ubica en la región de la costa Caribe, es una región tropical sobre la costa seca y semiárida que va desde la península de la Guajira hasta Santa Marta, con el régimen de lluvias y la vegetación cada vez más agreste, típicas de Barranquilla y Cartagena, hasta llegar a la región del río Atrato, en donde las condiciones tropicales extremas prevalecen y la precipitación es densa como en el resto del trópico y muy similar al clima de Panamá.

La costa Caribe en la región de Barranquilla y Cartagena recibe más lluvia que en otros sectores de la costa Caribe, pero aún no es suficiente para la siembra de cultivos y padece de extrema sequía entre los meses de octubre y mayo. En Barranquilla el clima es de tipo árido a semiárido caracterizado por altas temperaturas que en su valor máximo superan siempre los 31°C y en su valor mínimo están siempre por encima de los 24 °C; la temperatura promedio es del orden de 27.4°C. Aunque la precipitación media oscila entre los 800 y 1000 mm/año, se presenta un déficit de agua debido a que la tasa de evaporación anual es de 2579 mm/año (CIOH, 2010), condición en que la evaporación excede la precipitación, favorece la presencia de suelos desecados, formación de minerales evaporíticos y arcillas del tipo esméctica por precipitación de sales (Montero et al., 2013).

El clima de Barranquilla, además se encuentra influenciado por la Sierra Nevada de Santa Marta (formación montañosa litoral más alta del mundo), que constituye una barrera topográfica para los vientos alisios del noreste y contribuye a disminuir el promedio de lluvias en la época más seca del año (CIOH, 2010).

## **2.2 Entorno Geológico - Geomorfológico Regional de las zonas de estudio**

### **2.2.1 Sabana de Bogotá**

La Sabana de Bogotá, ubicada en la cordillera Oriental, hace parte de la Cadena del Norte de los Andes suramericanos, cuya depositación se inició desde finales del Paleozoico. Los depósitos de esta cuenca están soportados por un basamento continental; depósitos que fueron afectados durante todo el Cretácico por procesos distensivos y por una subsidencia que permitió la depositación “en un ambiente bastante tranquilo, de una sedimentación marina epicontinental que alcanza unos 10.000 m. de espesor en la Cuenca de Bogotá. En esta región oriental, ninguna discordancia angular se presenta en las secuencias sedimentarias” (Toussaint, 1993)

La geología para la Sabana de Bogotá se tomó del estudio realizado por INGEOMINAS (2004) (Cartografía Geológica Aplicada A La Zonificación Geomecánica de La Sabana De Bogotá, Volumen II) y del POMCA de la Cuenca del río Bogotá (CAR, 2018), geología que fue realizada por la CAR, a escala 1:25.000, los cuales son los documentos que contienen la información más actualizada a la fecha en el tema. Este aparte se centra en la descripción litoestratigráfica de las diferentes unidades presentes y posteriormente se efectúa una breve descripción de la geología estructural, solo en los temas que puedan aportar a esta investigación.

EL Servicio Geológico Colombiano – SGC, antiguo INGEOMINAS, ha desarrollado diferentes proyectos de investigación, tales como: la geología e hidrogeología de Santafé de Bogotá y su sabana (Lobo-Guerrero 1992) el Mapa geológico del cuadrángulo K-11, Zipaquirá (McLaughlin & Arce, 1975); el Neógeno – cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores (Van der Hammen & Karin, 2003); el Mapa Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá (2002); la Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá (INGEOMINAS, 1997b) el Mapa Geológico de Cundinamarca (INGEOMINAS, 1998); La Zonificación



Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá (1988) y el mapa geológico de la plancha 209, Zipaquirá (2004), son entre otros los informes que describen la estratigrafía de la sabana e incluyen el Municipio de Bogotá, con énfasis en el sector de los cerros orientales, en donde afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades del Cretácico tardío al Paleógeno (formaciones Chipaque, Conejo, Lidita superior, Grupo Guadalupe (Formaciones: Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca de Labor-Tierna), Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Usme y Conglomerados de Guandoque), y depósitos poco consolidados a no consolidados de edad Neógeno – Cuaternario, que se describen de más antiguas a los depósitos más recientes y se presentan en la Figura 2.7

En la Tabla 2.2 se presenta un resumen consolidado de las unidades litoestratigráficas de interés para la Sabana de Bogotá; es importante anotar que los materiales objeto de esta investigación se ubican en las algunas de las unidades del Neógeno -Cuaternario por ser las más recientes y a las cuales se les puede identificar un ambiente de depositación lacustre y/o fluvio lacustre que define su génesis.

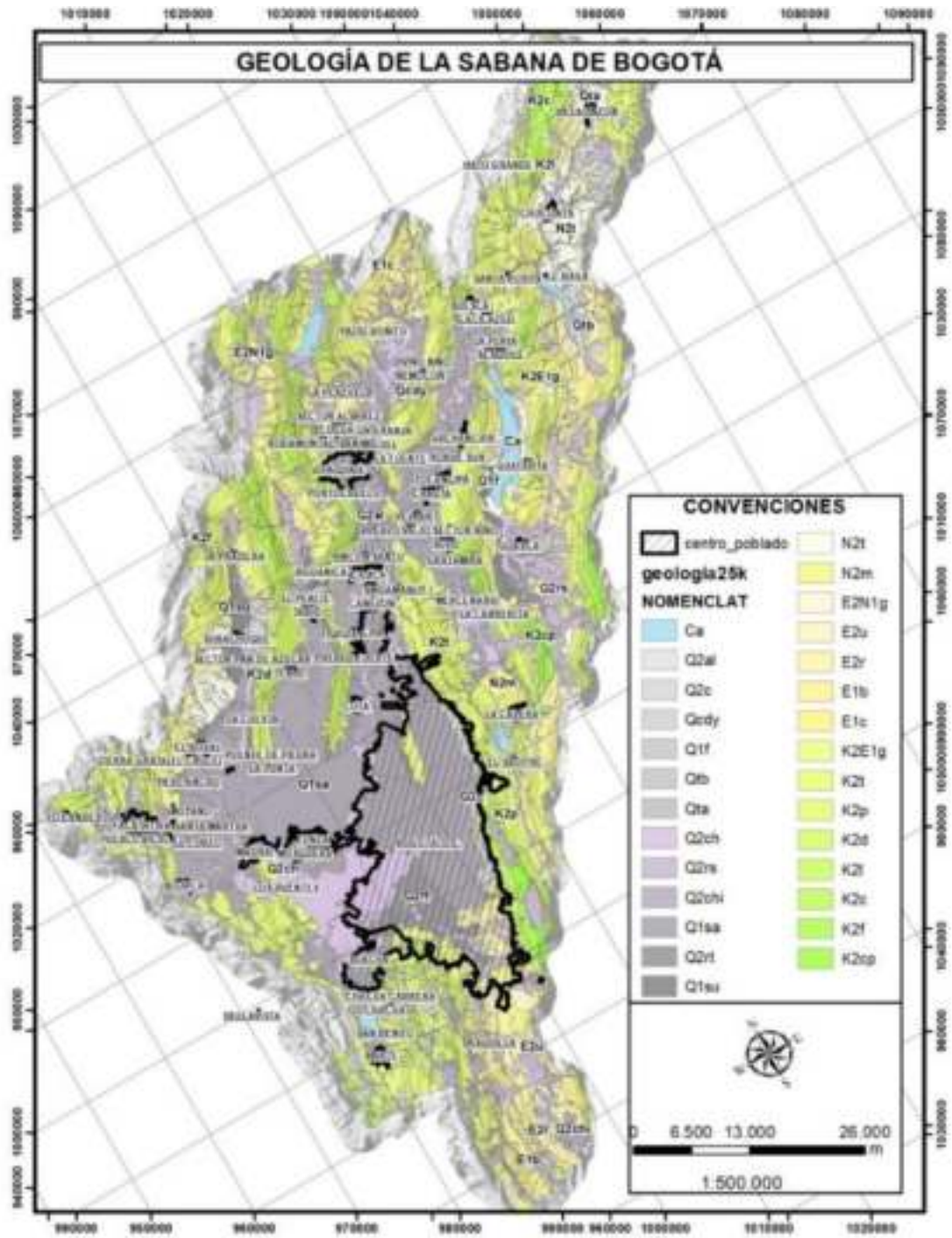


Figura 2.7. Mapa geológico de la Sabana de Bogotá. Adaptado de POMCA del río Bogotá (2018).

*Tabla 2.2*  
*Unidades litoestratigráficas de interés geológico para esta investigación en Sabana de Bogotá.*

Unidad litoestratigráfica	Símbolo	Descripción	Materiales	Edad y ambiente de formación
Formación Bogotá	E1b	Esta unidad fue referenciada por Hubach, (1945) y redefinida por el mismo autor en (1957). Forma parte del piedemonte de algunos cerros que bordean la Sabana de Bogotá.	Consta de dos conjuntos: a) el inferior donde alternan arcillolitas de color gris oscuro y amarillo naranja, y areniscas cuarzosas, gris verdosas de grano fino hacia la base y grueso hacia el techo, friables, en estratos de 0,15 y 4,0 m de espesor, y b) el conjunto superior constituido por arcillolitas gris oscuras, gris verdosas, y pardo – rojizas por meteorización	La Formación Bogotá ocurrió en un ambiente de llanura aluvial y de ríos meándricos (Helmens, 1990), durante el Paleoceno tardío- Eoceno temprano. Infrayace de manera discordante a la Arenisca de La Regadera
<b>Depósitos del Neógeno - Cuaternario</b>				
Formación Subachoque	Q1su	Corresponde a sedimentos de complejo lacustre – fluvial, observables en superficie en los valles de Subachoque, Guasca y Tabio - Tenjo, y se han detectado en profundidad en el centro de la Sabana	Está constituida por arcillas arenosas, arcillas orgánicas y turbas–lignitos que se alternan con arenas arcillosas, gravas y gravillas. En el pozo Funza II, está formación presenta un espesor de 150 m por debajo de 300 metros de profundidad. Los sedimentos más gruesos, gravas, gravillas y material de soliflucción, son indicativos de condiciones glaciales.	El ambiente de depositación de esta Formación, fue bajo condiciones alternas de periodos glaciales e interglaciales en la actual cuenca sedimentaria de la Sabana de Bogotá con un desarrollo en el centro del valle de sedimentos lacustres y la presencia de algunos niveles de turbas, indica que los niveles altos del lago fueron interrumpidos por periodos más secos. En los valles marginales, el ambiente ha sido interpretado como una alternancia de depósitos fluviales, lacústricos y pantanosos. La edad es Pleistoceno temprano (entre 2.4 y 1 millón de años A.P.).
Formación Sabana	Q1sa	Referenciada inicialmente por Hubach (1957). Se encuentra básicamente en el propio altiplano y cubre la parte más o menos plana de la sabana de Bogotá, suprayaciendo la Formación Subachoque y otras unidades	Está constituida por sedimentos lacustres, principalmente arcillosos con sectores puntuales de intercalaciones de arcilla orgánica, turba, arcillas arenosas, arenas arcillosas, gravas, gravillas y arenas depositados en las márgenes de la cuenca de la Sabana. En el centro de la cuenca representa aproximadamente 300 m de espesor, disminuyendo hacia los bordes.	Los datos palinológicos indican que fue depositada en un lago (ambiente lacustre) con fluctuaciones del nivel de agua, mostrando una relación estrecha con los cambios de las condiciones climáticas y de vegetación. La depositación cesó hace cerca de 30.000 (A.P.) años, con la desaparición del lago de la Sabana. La edad es inferior a 1 millón de años, aprox., Pleistoceno Medio a Tardío.
Formación Chía	Q2ch	Son los sedimentos fluviales de inundación y de los cauces actuales, observables a lo largo de los ríos principales que cruzan la Sabana	Está constituidos principalmente por arcillas grises claras, oscuras y amarillas; localmente puede contener limos y arcillas orgánicas de un espesor máximo que puede alcanzar los 5.00 m.	Estos depósitos se interpretan como generados por procesos erosivos en las regiones más áridas que rodean la Sabana de Bogotá, transportados por la acción dinámica de los drenajes durante el Pleistoceno Tardío a Holoceno.

### 2.2.2 Departamento del Quindío

El departamento del Quindío hace parte de la vertiente occidental de la cordillera Central donde afloran rocas de origen sedimentario, ígneo y metamórfico, sometidas localmente a fuertes procesos de fallamiento que han determinado las características geomorfológicas del territorio (INGEOMINAS, 2005); en general el sector nororiental presenta zonas montañosas y elongadas, mientras hacia el noroccidente el territorio en general es plano y suavemente inclinado y asociado tanto con flujos y lóbulos laharicos cubiertos tanto de un manto de piroclastos de caída como por llanuras aluviales localmente amplias asociadas con terrazas fluviales.

Hacia la parte occidental del departamento del Quindío, zona de interés para esta investigación, las geoformas son de morfología alomada constituida por rocas sedimentarias Terciarias de origen fluvial y lagunar (Formaciones La Paila y Zarzal respectivamente) de acuerdo con Suter (2003). Según este autor hacia la base de la formación La Paila en esta región se presentan lavas riolíticas y no dacíticas como lo referencian (González Iregui & Núñez Tello, 1991); del mismo modo determina la presencia de rocas arcillosas pertenecientes a la formación Zarzal como terrazas de erosión, lo cual define una cuenca del Quindío más amplia, cuya apertura y subsidencia se inicia desde el Plioceno, mucho antes de lo establecido previamente por otros autores. Cubriendo casi en su totalidad estas rocas a la altura del río La Vieja se encuentra el llamado abanico del Quindío constituido de flujos laharicos del Plioceno - Pleistoceno, y sedimentos principalmente de origen fluvial del Cuaternario más reciente.

Los aspectos temáticos correspondientes fueron extraídos esencialmente de La geología para el departamento del Quindío del estudio realizado por (INGEOMINAS, 2004) (Cartografía Geológica Aplicada A La Zonificación Geomecánica del departamento de Quindío, Volumen II). Las unidades de rocas aflorantes en el territorio del Quindío tienen edades que van desde el Precámbrico hasta el Cuaternario.

La unidad de interés para esta investigación en el departamento del Quindío se presenta en la Tabla 2.3; en la Tabla 2.4 se presenta en detalle las Subunidades del Glacis del Quindío o Abanico de Quindío dado su origen volcánico, de interés para este trabajo; igualmente, en la Figura 2.8 se presenta el mapa de geología básica del departamento del Quindío.

Tabla 2.3

Unidad litoestratigráfica de interés geológico para esta investigación en el departamento del Quindío (fuente propia)

UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	MATERIALES	EDAD
Glacis del Quindío	(Formación Armenia) (NgQa) ó Abanico del Quindío	Esta unidad ha un depósito presentado varias denominaciones: Flujo de Lodo del Quindío (Mosquera, 1978), Formación Armenia (McCOURT et al. 1948 <sup>a</sup> ), Glacis del Quindío (Núñez y Gonzáles, 1991), y recientemente, Abanico del Quindío (Espinosa, en Vargas et al, 2005). A éste depósito de Flujos de Lodo, le asignan una edad entre el Plio-Pleistoceno y el Reciente).	El Glacis ó Abanico del Quindío corresponde a un depósito fluviovolcánico; consta de numerosas intercalaciones lenticulares y tiene un espesor variable que puede sobrepasar los 100m., donde alternan depósitos piroclásticos, lahares, acumulaciones fluviales y glaciales. Cubre un 35% del área del departamento del Quindío, en los municipios de Quimbaya, Montenegro, La Tebaida, Filandia, Circasia, Calarcá y Salento	Cenozoico

Tabla 2.4

Subunidades litoestratigráficas de interés geológico para esta investigación en el departamento del Quindío (fuente propia)

Glacis del Quindío (Formación Armenia) (NgQa) ó Abanico del Quindío		
<b>Conjunto de Abanicos Intermedios.</b>	<b>Abanicos que cruzan el casco urbano de la ciudad de Armenia y sus alrededores</b>	<b>Depósitos Piroclásticos ó Piroclastos de Caída (Qto).</b>
Comprenden una franja ancha situada al occidente y al suroccidente de la unidad anterior, cuyo límite occidental pasa al oeste del sur de Armenia, al oriente de Montenegro y Quimbaya y al occidente de Ulloa. Estos abanicos tienen un pendiente promedio menor que los anteriormente mencionados, además de poseer una red de drenaje más compleja	La ciudad de Armenia posee los siguientes cuerpos pertenecientes al Abanico del Quindío, (Espinosa, en Vargas et al., 2005): Abanico de La Bella., Abanico de Circasia, Abanico de Armenia - Hojas Anchas, Abanico de La Florida, Abanicos del río Quindío y del río Santo Domingo.	Estos depósitos especialmente ceniza volcánica, forman un manto de espesor variable en casi toda el área del departamento. Estas cenizas, provienen de los volcanes del Complejo Ruíz-Tolima. Las capas de ceniza cubren en parte, flujos de lodo volcánico, probablemente periglaciares y sedimentos fluviales del Glacis del Quindío y en general siguen la morfología del terreno cubriendo en su mayor parte las formaciones rocosas más antiguas.

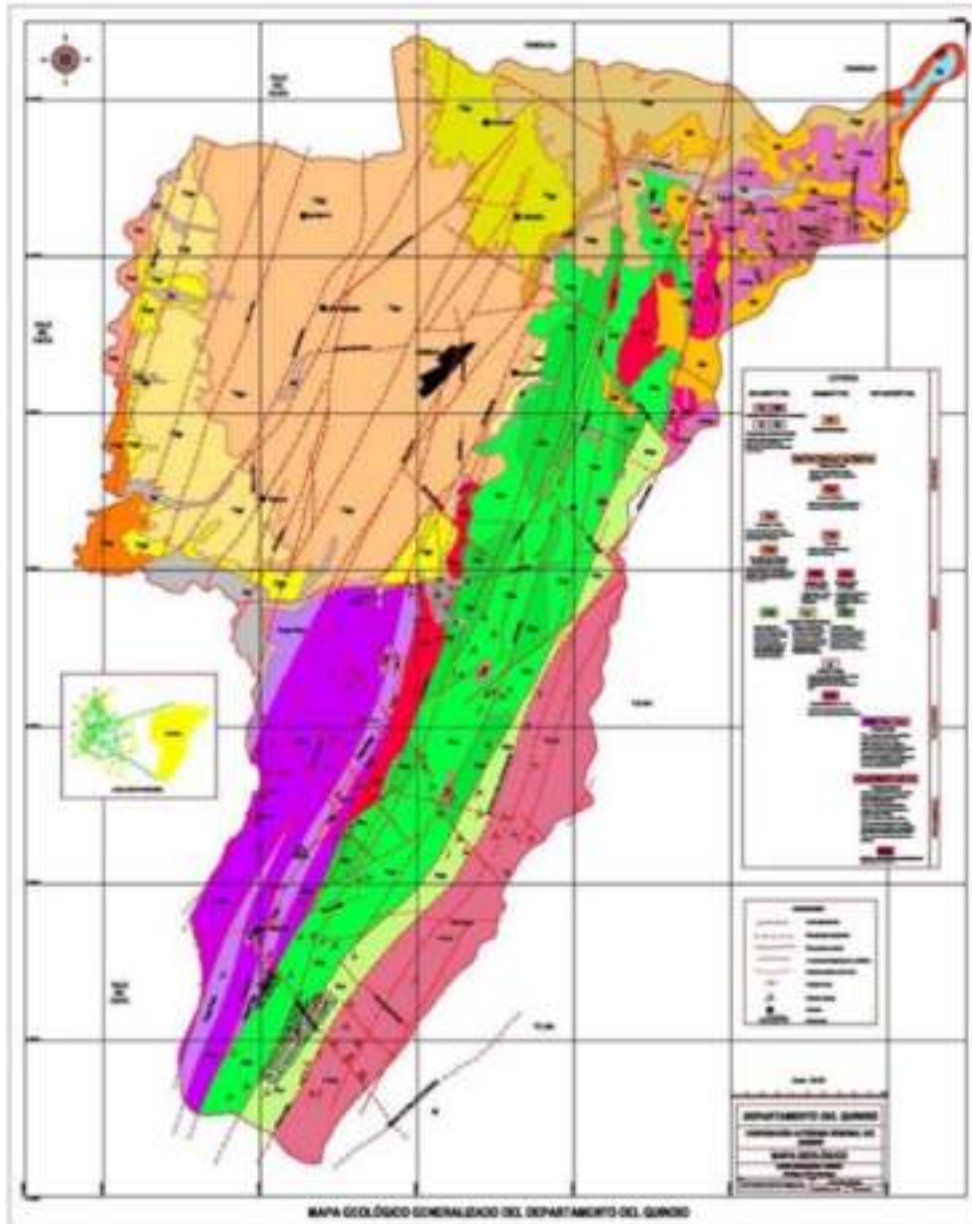


Figura 2.8 Mapa geológico generalizado del departamento del Quindío. Tomado de INGEOMINAS (1999)

### 2.2.3 Municipio de Barranquilla

La ciudad de Barranquilla ubicada al Norte de Colombia, en la confluencia del río de la Magdalena al Mar Caribe, se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias del Cretáceo Superior y el Terciario y depósitos Cuaternarios afectados por una tectónica activa, en donde convergen las fallas del sistema de rumbo Sinistral Santa Marta–Bucaramanga de rumbo NW y la

falla San Jacinto de rumbo NE, perteneciente al sistema Romeral y fallas menores como Luruaco y Puerto Colombia, consideradas responsables de buena parte de la inestabilidad geotécnica de los suelos que soportan el desarrollo urbanístico de Barranquilla, tal como se observa en la figura 2.9.

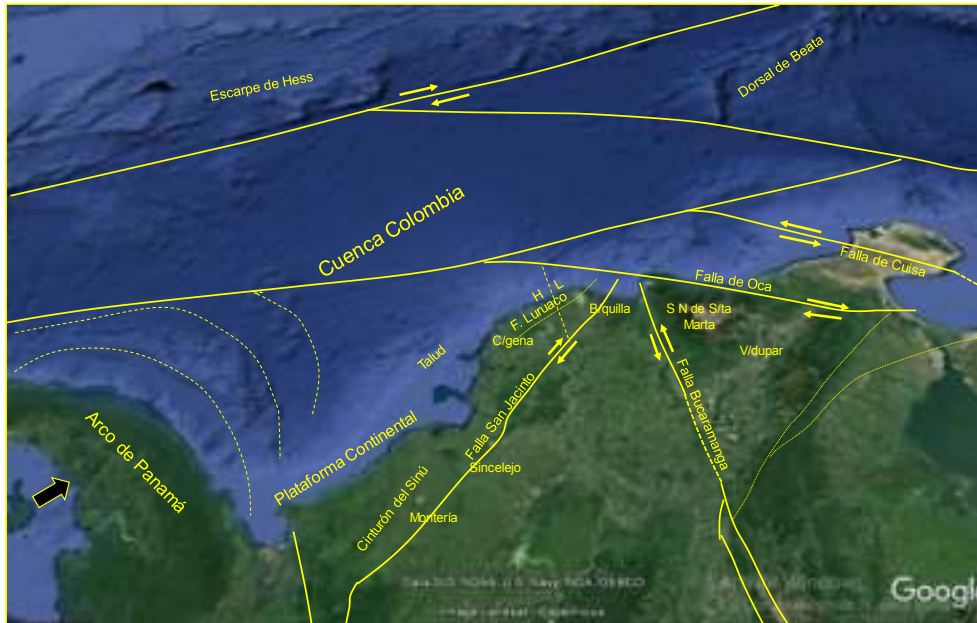


Figura 2.9 Marco geológico tectónico regional del Municipio de Barranquilla. (Fuente: Modificado de Google earth, 2017.)

La información geológica disponible de mayor escala del Municipio de Barranquilla es la elaborada por INGEOMINAS (2011), para la Zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa en las laderas occidentales del Municipio, a escala 1:10.000. Para la parte oriental de la ciudad solo existen las planchas 16 y 17 Galerazamba-Barranquilla a escala 1:100.000 del año 2001, con sus respectivas memorias explicativas, (INGEOMINAS, 2001), que muestran que en el costado oriental de la ciudad se presentan depósitos coluvio-aluviales y la formación la Popa. Por lo tanto, la descripción litoestratigráfica y tectónica efectuada para el proyecto toma la nomenclatura definida por el Servicio Geológico Colombiano en 2001 y 2011 respectivamente.

La cartografía geológica a escala 1:10.000, identifica rocas sedimentarias de edad Neógeno y depósitos cuaternarios aluviales, coluviales y antrópicos como las unidades litoestratigráficas que soportan el desarrollo urbanístico del Occidente de Barranquilla, mientras que, en el costado



oriental de la ciudad, se presentan depósitos coluvio-aluviales y la formación la Popa. Rocas y depósitos que se describen cronológicamente a partir de las rocas más antiguas, figura 2.10.

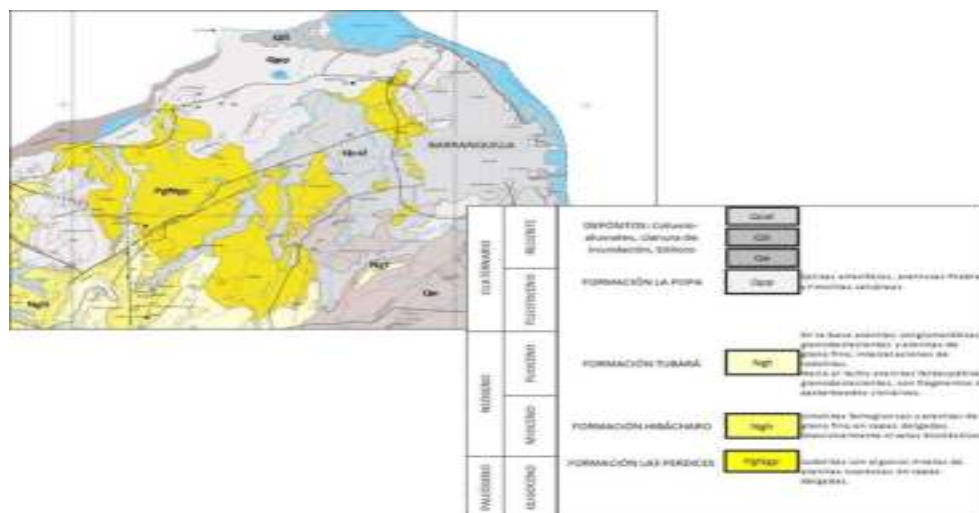


Figura 2.10 Mapa Geológico y secuencia litoestratigráfica del área metropolitana de Barranquilla (Fuente: adaptado INGEOMINAS 1997)

El marco geológico regional de la placa Caribe colombiana en donde se ubica la Cuenca Canal del Dique, no puede entenderse sin hacer referencia a la evolución geológica de la esquina noroccidental de Suramérica y su relación con el origen de la placa caribe. El territorio colombiano, situado en el borde noroccidental de la placa suramericana, es un vértice clave en la evolución geológica de Suramérica. Las unidades geológicas se depositaron en fondos de sedimentación relacionados con la margen de dos provincias: una provincia con basamento oceánico al occidente y la otra con basamento continental al oriente.

En la Tabla 2.5 se presenta la información litoestratigráfica para la unidad de interés para esta investigación dentro del municipio; igualmente, en la Figura 2.11 se presenta el mapa Geológico de las laderas occidentales de Barranquilla, escala 1:10.000, zona de interés para esta investigación. Es importante anotar que los análisis se dirigen primordialmente a las unidades a las cuales se les puede identificar un origen marino costero; sin embargo, muchas de estas unidades subyacen suelos residuales y denudacionales.





Figura 2.11 Mapa Geológico de las laderas occidentales de Barranquilla, escala 1:10.000 (Fuente: INGEOMINAS 1997)

Tabla 2.5

Unidades litoestratigráficas de interés geológico para esta investigación en el municipio de Barranquilla (fuente propia)

UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	MATERIALES	EDAD
Formación las perdices	Nombre asignado por Anderson (1929) para designar una secuencia de shales, shales arenosos, capas de chert y algunas areniscas observadas unos 2,5 Km al suroccidente de Barranquilla en un sector rural denominado Las Perdices; según Deporta (1974) en esta unidad en su sección tipo presenta un espesor aprox., de 400 pies. Sin embargo, su espesor es variable de Sur a Norte, así como su edad es Oligocena (al Sur) a Mioceno inferior (al Norte) y una relación estratigráfica discordante en el techo con la Formación Hibacharo y en la base con las Formación Péndales, Barrera (2001)	esta unidad se caracteriza por su carácter pélitico de colores grises y amarillos, dependiendo del estado de meteorización; algunos niveles presentan fisilidad, mientras otros tienen una partición concoidea, con tintes de oxidación de color pardo y cristales de yeso. Esporádicamente están intercaladas con arenitas amarillas cuarzosas de grano fino con laminación plano-paralela y delgadas capas levemente onduladas. El espesor estimado puede sobrepasar los 20 m, según reportes de las perforaciones efectuadas por el SGC (2011).	Para Anderson (1929) esta unidad es del Mioceno; Van der Hammen (1958) la considera del Mioceno inferior; Bürgl et al. (1955), en la sección del Arroyo Seco, establece un rango entre el Oligoceno y el Mioceno; Raasveldt (1953) le asigna una edad Oligocena

### 2.3 Consideraciones Generales

El comportamiento geomecánico de los suelos finos predominantemente arcillosos obedece a variables ligadas a factores referidos a su origen geológico geomorfológico que se puede analizar desde la megaescala y se ve reflejado en comportamientos asociados a la macroescala o características mecánicas que son observables en laboratorio, así como factores asociados a la fábrica, observables solamente a nivel de la microescala.

Al hablar de la génesis de los materiales, una selección adecuada de las áreas de estudio es primordial para que se logre establecer una adecuada comparabilidad de las variables que definen el comportamiento geotécnico de los suelos, en este caso las arcillas o suelos finos predominantemente arcillosos, respecto de su respuesta en resistencia y deformación, frente a sus características endógenas definidas por su origen y los factores exógenos asociados a la evolución que han afectado su comportamiento geomecánico.

Para este trabajo, el proceso de selección de las zonas piloto obedeció a un análisis deductivo, que parte del conocimiento geológico geomorfológico regional a escala pequeña (1:25.000 a 1:10.000) y que llega hasta el análisis geotécnico local a escala grande (escalas 1:2000 a 1:1000), teniendo como base en primer lugar la génesis asociada al ambiente morfogenético propuesto por (Verstappen & Zuidam, 1992), a partir de lo cual se definieron tres zonas de estudio en Colombia para esta investigación: una primera zona con suelos de ambiente fluvial y lacustre en Sabana de Bogotá, una segunda zona de suelos de ambiente volcánico en el centro occidente del departamento de Quindío y una tercera zona de suelos de ambiente marino profundo y costero en un sector del municipio de Barranquilla; en segundo lugar se tuvo en cuenta aspectos fisiográficos tomando zonas planas a levemente onduladas con pendientes menores a 5 grados y materiales predominantemente arcillosos en los 30 metros superficiales y preferiblemente con poca o ninguna modificación antropogénica; en tercer lugar se tuvo en cuenta que las zonas estuvieran localizadas en zonas geoclimáticas diferentes (Eslava, 1993; Peltier, 1973; Thornbury, 1960) respectivamente: fría (Sabana de Bogotá), cálida (costa Caribe), y media (departamento de Quindío).

Como aspecto final, pero no de menor importancia, se tomó en cuenta la existencia de información geotécnica de caracterización básica, geomecánica y química; esto con el fin de

efectuar una selección apropiada de zonas en las cuales se desarrollaron sondeos exploratorios directos con obtención de muestras alteradas e inalteradas para la ejecución de ensayos de laboratorio.

Para las zonas piloto seleccionadas se identificaron las unidades de interés litoestratigráfico que se correlacionan con el ambiente de morfogenético definido para esta investigación: para Sabana de Bogotá identificada preliminarmente como zona piloto 1 se tienen cuatro unidades litoestratigráficas de interés: Formación Bogotá ( E1b), Formación Subachoque (Q1su), Formación Sabana (Q1sa) y Formación y Formación Chía (Q2ch), siendo las tres últimas unidades del Neógeno cuaternario; para esta zona es de especial interés la Formación Sabana, para la cual los datos palinológicos indican que fue depositada en un lago (ambiente lacustre) con fluctuaciones del nivel de agua, mostrando una relación estrecha con los cambios de las condiciones climáticas y de vegetación: para la zona piloto 2 departamento del Quindío se tiene como unidad de interés litoestratigráfico para esta investigación el Glacis del Quindío que está conformado por las Subunidades Formación Armenia (NgQa) y el Abanico de Quindío del cual hacen parte Depósitos Piroclásticos o Piroclastos de Caída (Qto), depósitos fluviovolcánicos; consta de numerosas intercalaciones lenticulares y tiene un espesor variable que puede sobrepasar los 100m., donde alternan depósitos piroclásticos, lahares, acumulaciones fluviales y glaciales ; para el caso de la zona piloto 3 se tiene como unidad litoestratigráfica de interés la Formación Perdices, la cual es una secuencia de shales, shales arenosos, capas de chert y algunas areniscas observadas unos 2,5 Km al suroccidente de Barranquilla en un sector rural denominado Las Perdices. Con base en esta información regional se desarrollaron los análisis y aplicación metodológica correspondiente para la selección final de las zonas de estudio a escala local que se presentara en los capítulos subsiguientes.

# **CAPITULO 3**

## **METODOLOGÍA**

### **3 METODOLOGÍA**

La metodología de trabajo planteada para el desarrollo de esta investigación comprende básicamente siete partes que se resumen en la siguiente forma, tal como se presenta en la Figura 3.1:

1. Revisión estado del arte y análisis de antecedentes.
2. Generación de modelo geológico – geomorfológico por zona piloto.
3. Construcción de base de datos geotécnica para identificación de puntos de exploración.
4. Trabajos de campo (exploración geotécnica).
5. Trabajos de laboratorio.
6. Trabajos de oficina en Fases 1 (previo a exploración geotécnica) y Fase 2 (posterior a la exploración geotécnica, toma de muestras y trabajos de laboratorio).
7. Discusión y conclusiones.

#### **3.1 Revisión estado del arte y análisis de antecedentes**

La revisión del estado del arte y antecedentes cubre los siguientes aspectos, que se detallan en el capítulo 4 de este documento:

- a. Aspectos teóricos de importancia para esta investigación y que se usarán para identificar el origen y evolución de los materiales arcillosos desde la morfogenética en las zonas piloto en evaluación.
- b. Aspectos teóricos relevantes para esta investigación referidos a la geotecnia aplicada para la caracterización del comportamiento de arcillas y limos.

- Fábrica y estructura
  - Minerales arcillosos
  - Historia de esfuerzo y propiedades esfuerzo – deformación
  - Condición de carga y resistencia al corte
- c. Aspectos teóricos relevantes para la Identificación de los Modelos constitutivos que se aplicarán en esta investigación y variables geotécnicas requeridas.
- d. Antecedentes Unidades Geológicas Superficiales y Subunidades geomorfológicas por zona piloto.

### **3.2 Generación de modelo geológico – geomorfológico para la identificación de zonas de estudio desde escala regional a escala y media y local por zona piloto**

Para efectuar la delimitación de las posibles zonas de exploración directa para obtención de parámetros geomecánicos que se requieran para los modelos de comportamiento y el posterior análisis comparativo de resultados que se requiere realizar, se establecieron criterios de replicabilidad y comparabilidad para los materiales en estudio. Dada la escala de trabajo y que la variable de enlace entre los diversos componentes que dan lugar a la formación y caracterización de los materiales de superficie es la geomorfología, se aplicó el procedimiento que se detalla enseguida para las tres zonas piloto: Sabana de Bogotá, Quindío y el municipio de Barranquilla, para establecer un modelo geológico –geomorfológico a partir del cual se pueda identificar a escala detallada y con baja incertidumbre, la ubicación de los puntos de toma de muestras en las zonas piloto definidas a escala local, en la siguiente forma:

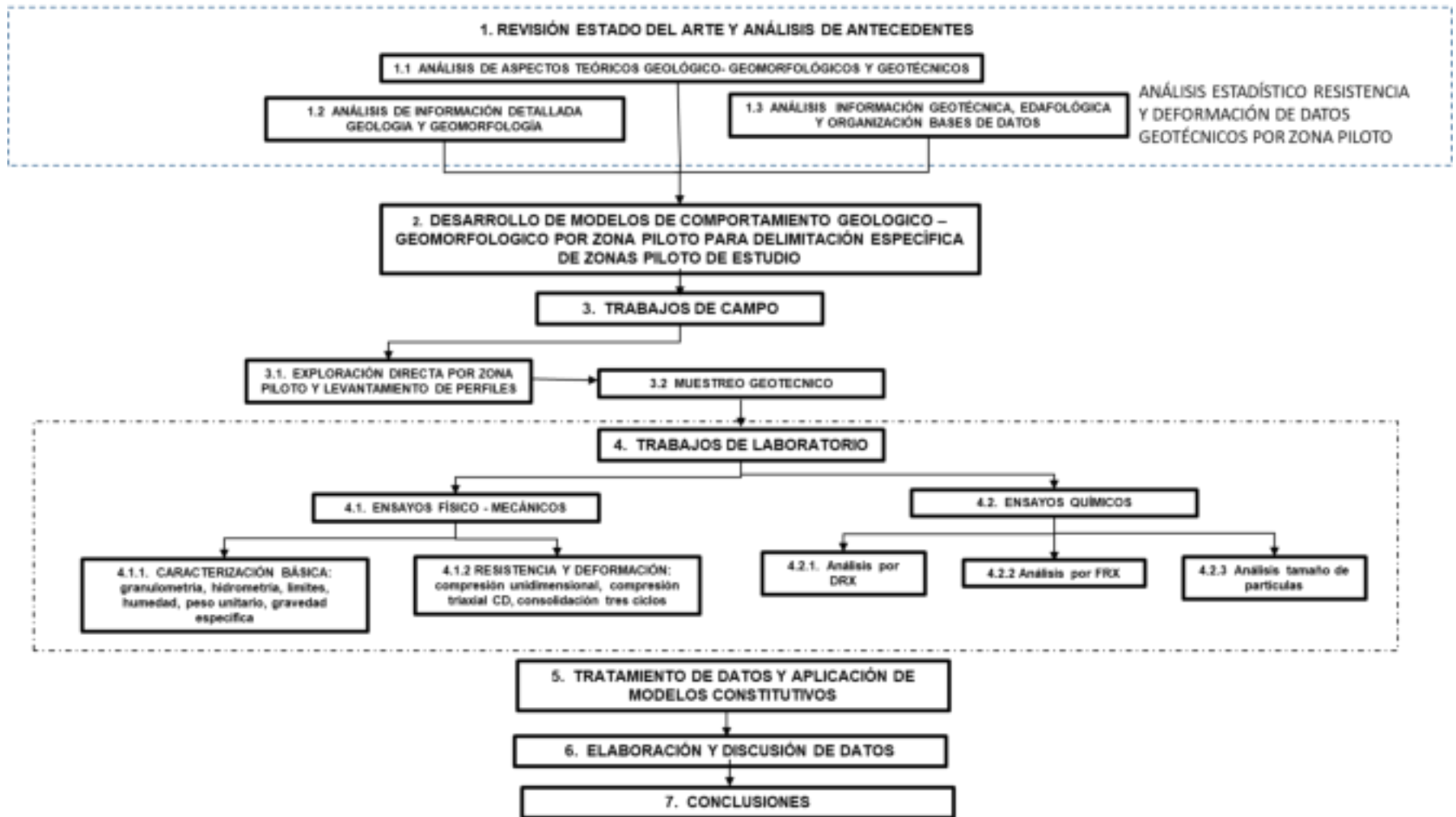
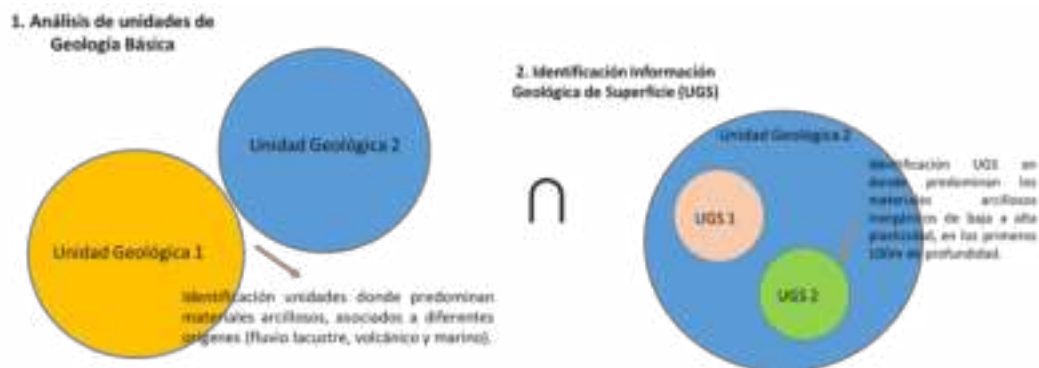


Figura 3.1 Enfoque metodológico del estudio (Fuente: Propia)

1. Caracterización Geológica del área de estudio: Para cada zona piloto en evaluación y con base en la información geológica de la zona, se identificaron las unidades de geología básica y de superficie con predominio de materiales arcillosos asociados a un origen fluvio lacustre, volcánico y marino con el uso de cartografía a escalas entre 1:25.000 y 1:10.000. Posteriormente se identificaron sobre estas unidades a partir de un análisis básico en SIG, las unidades geológicas de superficie (UGS) en donde predominaran materiales arcillosos o limo arcillosos inorgánicos de baja a alta plasticidad, en los primeros 100m de profundidad.



*Figura 3.2 Proceso esquemático de selección de zonas piloto de estudio de escala regional a escala media - Parte 1 (fuente propia)*

2. Análisis de subunidades geomorfológicas con cartografía a escalas entre 1:25.000 y 1:10.000: Sobre las UGS identificadas se delimitaron las subunidades geomorfológicas que se asocian al origen del material (fluvio lacustre, volcánico y marino) con pendientes bajas entre 0 y 10 grados en las zonas piloto previamente identificadas a partir de criterios geomorfoestructurales y morfogenéticos que permiten relacionar el clima con las condiciones de humedad que se pueden asociar al grado de meteorización de los materiales, igualmente a partir de un análisis SIG básico por intersección de las diferentes cartografías indicadas: UGS, Subunidades geomorfológicas, mapa de pendientes.
3. Modelo geológico – geomorfológico con uso de unidades edáficas texturales a escala 1:10.000 para delimitación de zonas homogéneas: A partir de la información producto del análisis textural de materiales de superficie obtenida producto de cartografía edáfica desarrollada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi para todo el país, en donde se presenta la clasificación



geotécnica de los suelos de superficie hasta aproximadamente 2 metros de profundidad, se seleccionaron áreas con arcillas de alta a baja plasticidad, cartografía que a partir de un proceso básico SIG de intersección de mapas logro obtener la delimitación de polígonos en donde se tienen los materiales del origen requerido cumpliendo con los criterios de selección indicados en párrafos anteriores; es importante anotar que se carece de esta cartografía en el municipio de Barranquilla.

4. Se identificaron áreas a nivel municipal por zona de estudio, es decir áreas a escala 1:10.000

### **3.3 Construcción de base de datos geotécnica para identificación de puntos de exploración**

Luego de identificadas las áreas nivel municipal por zona piloto, que cumplen con los criterios requeridos para análisis de los suelos en estudio presentes y con el fin de recopilar, integrar, y georreferenciar la información geotécnica existente, se generó una base de datos básica con base en la información pública que ha generado el SGC relacionada a los parámetros geotécnicos obtenidos mediante ensayos de laboratorio y ensayos in situ y estudios que se recopilaron de entidades externas; en esta investigación se desarrolló una búsqueda de la información disponible de acuerdo a las zonas de interés a través del Motor de integración de información Geocientífica del SGC (MIIG), información análoga existente en la biblioteca del SGC que fue insumo para el desarrollo del proyecto “Zonificación Geomecánica de la Sabana de Bogotá” (INGEOMINAS, 2004) y “Zonificación Geomecánica del departamento del Quindío” (INGEOMINAS, 2005); igualmente para el municipio de Barranquilla se contó con la información disponible de mayor escala del Municipio de Barranquilla elaborada por INGEOMINAS (2011), para la Zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa en las laderas occidentales del Municipio, a escala 1:10.000. No se incluyó en la búsqueda zonas urbanas como Bogotá, la cual cuenta con gran cantidad de información, así como Armenia en el área urbana dada la gran perturbación que se ha generado por la ocupación de estas zonas.

La base de datos básica contiene información geotécnica de 1655 muestras; consta de 47 atributos distribuidos en la siguiente forma: 14 variables referidas a la localización espacial y en profundidad; diecinueve (19) variables referidas a propiedades índice, granulometría, hidrometría y clasificación USC, tres (3) variables referidas a la permeabilidad, once (11) variables referidas a la

consolidación unidimensional y ensayo de expansión, cinco (5) variables referidas a la compresión simple, veintiséis (26) variables referidas a ensayos triaxiales y de corte directo, tal como se muestra en la Figura 3.3. La información de la base de datos cubre las siguientes áreas de las zonas piloto:

1. Sabana de Bogotá: municipios de Tabio y Tenjo (266 muestras)
2. Departamento del Quindío: municipios de Tebaida, Armenia, Montenegro (1182 muestras)
3. Municipio de Barranquilla: 207 muestras seleccionadas de 505 muestras existentes en la zona.

LOCALIZACION											PROPIEDADES INDICE											
CODIGO INTERNO DE MUESTRA	TIPO DE INFORMACIÓN	CODIGO PROYECTO	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	DENSIDAD RELATIVA (%)	SATURACION	RELACION DE VACIOS

GRANULOMETRIA MISMA ENTIDAD					HIDROMETRIA				PERMEABILIDAD			
TAMIZ No. 4 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 100 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	GRAVEDAD ESPECIFICA	(%) DE ARCILLA	(%) DE LIMO	(%) ARCILLA MENOR DE 2 MICRAS	CLASIFICACION USCS	Kt (cm/s)	GRADO DE PERMEABILIDAD	K20 (cm/S)

CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL										COMPRESION INCONFINADA				
PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECÍFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm3)	PESO UNITARIO SECO (g/cm3)	qu INCONFINADA (kg/cm2)	DEFORMACION UNITARIA
<b>ENSAYO TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO (CU)</b>														

PRES. CAMARA (kg/cm2) PUNTO 1
PRES. POROS INICIAL (kg/cm2) PUNTO 1
ESFUERZO EFECTIVO INICIAL (kg/cm2) PUNTO 1
HUMEDAD INICIAL (%) PUNTO 1
HUMEDAD FINAL (%) PUNTO 1
PRES. CAMARA (kg/cm2) PUNTO 2
PRES. POROS INICIAL (kg/cm2) PUNTO 2
ESFUERZO EFECTIVO INICIAL (kg/cm2) PUNTO 2
HUMEDAD INICIAL (%) PUNTO 2
HUMEDAD FINAL (%) PUNTO 2
PRES. CAMARA (kg/cm2) PUNTO 3
PRES. POROS INICIAL (kg/cm2) PUNTO 3
ESFUERZO EFECTIVO INICIAL (kg/cm2) PUNTO 3
HUMEDAD INICIAL (%) PUNTO 3
HUMEDAD FINAL (%) PUNTO 3
COHESION NO DRENADA Cu (Kg/cm2)
ANGULO DE FRICCION $\Phi$
PRESION DE POROS (SI-NO)

ENSAYO TRIAXIAL CONSOLIDADO DRENADO (CD)					CORTE DIRECTO		EXPANSION CONTROLADA SUELOS EXPANSIVOS ASENTAMIENTO O
DEFORMACION UNITARIA AXIAL	ESFUERZO TOTAL MENOR $\sigma_3$	ESFUERZO TOTAL MAYOR $\sigma_1$	ESFUERZO DESVIADOR	COHESION C	ANGULO DE FRICCION $\Phi$	ANGULO DE FRICCION $\Phi$ (°)	

Figura 3.3 Variables incluidas en la base de datos de información geotécnica (fuente propia)

### 3.4 Trabajos de Oficina Fase 1

Con base en el análisis de información secundaria geológica, geomorfológica, geotécnica, química existente en las zonas de estudio y posteriores trabajos de reconocimiento de campo en las zonas piloto seleccionadas, se identificó en superficie la existencia de suelos arcillo limosos adecuados a esta investigación, los cuales ya habían sido previamente identificados en el territorio colombiano a partir de la experiencia de la autora: sector de Campo Alegre (Barranquilla), Sabana de Bogotá en la zona centro occidente (departamento de Cundinamarca) y sur occidente del departamento del Quindío. Con base en esta primera fase de trabajo se generó, con el uso de SIG y mapas a escala 1:25000 para Sabana de Bogotá y departamento de Quindío un modelo geológico – geomorfológico para determinación de zonas homogéneas respecto de esta investigación; en el caso del municipio de Barranquilla se generó un mapa escala 1:10.000.

Posteriormente, se efectuó un análisis de la información de laboratorio geotécnico existente y se consolidó la información en la base de datos creada, efectuando un análisis respecto de las propiedades físicas, químicas y geomecánicas de los suelos presentes en los sondeos geotécnicos analizados en las zonas preseleccionadas, con el fin de determinar a nivel local

polígonos o zonas geológico – geotécnicas homogéneas con fines de exploración geotécnica directa a escala local (menor a 1:1000).

Con base en la densidad y calidad de la información geotécnica secundaria encontrada y analizada en las áreas de estudio seleccionadas, se planteó una exploración geotécnica básica para posterior toma de muestras en profundidades mínimas de 10.0 a 15.0 metros, con el fin de desarrollar ensayos de laboratorio físicos, químicos y mecánicos para obtener algunos parámetros importantes aplicables en los modelos constitutivos seleccionados y con los cuales se pueda evaluar su comportamiento esfuerzo –deformación ante diferentes condiciones de saturación y carga.

Las actividades de gabinete en Fase 1, desarrolladas para esta investigación son las siguientes:

- Compilación y análisis de información del estado del arte y antecedentes por zona piloto.
- Desarrollo de un análisis multiescalar de información geológica, geomorfológica, geotécnica, química, hidrológica y climática en los sectores de Campo Alegre (Barranquilla), Sabana de Bogotá la zona centro occidental y el sector suroccidental del departamento del Quindío.
- Construcción de base de datos de información geotécnica recopilada en las zonas piloto en estudio.
- Construcción de un modelo de comportamiento geológico – geomorfológico a escala 1:25.000 para Sabana de Bogotá y Quindío, y escala 1:10.000 para Barranquilla y generación de cartografía geológico – geotécnica a partir del uso de herramienta SIG.
- Construcción de mapas de ubicación de zonas de exploración geotécnica a escala 1:1000 para Sabana de Bogotá y Quindío. En Barranquilla no se desarrolló exploración geotécnica.

- Análisis estadístico de información geotécnica de base de datos por zona piloto para caracterización básica y geomecánica a partir de correlaciones e información geotécnica.

### 3.5 Trabajos de campo (exploración geotécnica)

Con base en la información geotécnica disponible en las zonas organizada en la base de datos se identificaron las áreas en las cuales se tiene la mayor densidad de información de muestreo geotécnico hasta 30 metros de profundidad, tal como se esquematiza en la figura 3.4.



Figura 3.4 Proceso esquemático de selección de zonas piloto de estudio de escala local - Parte 2 (fuente propia)

Para la identificación final de los puntos de muestreo se establecieron criterios de selección que cubren los siguientes aspectos por zona piloto: Unidad geológica de superficie, pendiente del terreno, subunidad geomorfológica, materiales geotécnicos de superficie predominantemente arcillosos hasta 2.0 mts de profundidad, densidad de información de exploración geotécnica secundaria tomada de la base de datos y puntos de exploración geotécnica directa desarrollados entre 2019 y 2021 por SGC, con base en los cuales se desarrollaron mapas de correlación con el uso de SIG por zona piloto. Con base en lo indicado, se delimitaron en polígonos las zonas más adecuadas para la toma de información producto de la exploración geotécnica y toma de muestras.

El Servicio Geológico Colombiano desarrolló trabajos de exploración geotécnica dentro del proyecto “Caracterización Geotécnica de Arcillas” desarrollado entre 2019 y 2021; la Dirección de Laboratorios del SGC autorizó el seguimiento a los trabajos de exploración y el uso de algunas muestras para ejecución de ensayos de laboratorio con fines exclusivos para esta investigación; se

hizo seguimiento a las actividades de perforación y muestreo para las zonas piloto de Sabana de Bogotá y Quindío respectivamente; para el municipio de Barranquilla los análisis se realizaron con la información existente. Para la obtención de las muestras se usó un equipo de perforación mecánica por rotopercusión (motor Lombardini) con broca diamantina y recuperación continua de núcleos de diámetro NQ entre los 2 y 15 metros de profundidad; en los casos requeridos para estabilizar se usó lodo bentonítico (Figura 3.5).



*Figura 3.5. Equipo de perforación por rotopercusión (fuente propia)*

Las muestras recuperadas fueron recubiertas con papel vinipel y empacadas en cajas, para después ser transportadas a cuartos húmedos con el fin de evitar en lo posible la pérdida de condiciones naturales de los materiales muestreados. Posteriormente fueron almacenadas en el cuarto húmedo del laboratorio de geotecnia del SGC.

### **3.6 Trabajos de Laboratorio**

Se desarrolló un programa experimental de laboratorio para las muestras obtenidas del muestreo geotécnico en Quindío y Sabana de Bogotá, orientado a caracterizar sus propiedades físicas, microestructurales y de comportamiento geotécnico en resistencia y deformación para las muestras naturales inalteradas. Es importante anotar, que una parte muy importante del trabajo desarrollado se centró en una selección del punto de muestreo por zona piloto muy cuidadosa con

el cumplimiento de diferentes requerimientos que permitiera establecer condiciones que permitan comparar los resultados de los diferentes ensayos geotécnicos ya ejecutados o aplicados para el desarrollo de este trabajo.

Es importante anotar que, dado que se usarán resultados producto de información primaria (exploración y muestreo de campo) y de información secundaria, estos últimos sobre los cuales no se tiene control sobre el procedimiento usado para la recuperación de muestras y ejecución de ensayos de laboratorio, los ensayos de laboratorio que se aplicaron a las muestras obtenidas son ensayos básicos convencionales que parten de lo solicitado en el Reglamento NSR-10 título H, o Norma para la construcción sismo resistente aplicada en Colombia hasta la fecha; cuyo fundamento se encuentra en la Norma de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, ASTM.

La caracterización física incluye, tamaño de partículas, peso específico de sólidos y propiedades índice; el acercamiento al análisis de la microestructura de muestras naturales solo se efectuó para la identificación del tamaño con el uso de difracción laser; por último, el comportamiento geomecánico se enfoca en el estudio de la respuesta esfuerzo – deformación en condiciones críticas de los materiales, tal como lo establece la norma NSR-10 para Colombia.

El peso específico de sólidos y demás propiedades índices tales como límites de consistencia y peso unitario fueron obtenidos de acuerdo con los procedimientos descritos en las normas ASTM (D2216 – D422-63, 1998; D4318 – D854, 2010), siendo estos los ensayos convencionales usados en la práctica de la ingeniería geotécnica para estos trabajos. Estos ensayos fueron realizados en los laboratorios de geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada, y en el Laboratorio de Geotecnia del SGC.

Igualmente, para los análisis de la microfábrica se efectuaron ensayos de composición mineralógica con el uso de Difractómetro de Rayos X y fluorescencia (FRX) para determinar minerales y elementos.

A continuación, se describen algunos de los procedimientos de laboratorio utilizados que se dividieron en tres grupos: físicos, químicos y geomecánicos, naturalmente algunos de los ensayos realizados pueden ser usados para analizar más de una característica. Solo se efectúa descripción

especial de los ensayos sobre los cuales se aplicaron diferentes técnicas con el fin de disminuir las incertidumbres.

### **3.6.1 Caracterización Básica (física y química – Sistema de Clasificación)**

Existen comportamientos especiales de los suelos finos asociados a cambios importantes en resistencia y deformación sin que medien cambios importantes en los esfuerzos aplicados, tal como se describió en la descripción del problema de investigación. Estos son los denominados suelos metaestables o suelos susceptibles de manifestar una variación en su estado de tensiones o en su estructura (provocando una deformación) sin que para ello sea necesaria la aplicación de una fuerza externa. Manifestaciones de este comportamiento son: Sensibilidad ( $S_t$ ), Colapsabilidad, Compresibilidad, entre otros. En la práctica convencional de la ingeniería geotécnica, a partir de la información producto de las propiedades índice de los materiales, es posible, a partir de diferentes correlaciones semiempíricas, establecer la susceptibilidad que pueden presentar los materiales a ciertos comportamientos como la expansión, el colapso y la actividad, esta última asociada a la sensibilidad y la expansión.

En este sentido, es de especial importancia el análisis de los parámetros producto de la caracterización básica, los cuales se asocian también al sistema de clasificación de materiales, que para esta investigación se usará el Sistema Unificado de Clasificación de suelos USCS (ASTM D 2487) que intenta categorizar los suelos según su comportamiento y el tamaño de partícula. Dentro de los fundamentos físicos que dan sustento a este sistema se destaca el balance entre las fuerzas a nivel de las partículas, la habilidad de ensamblaje o de acomodación de estas, las condiciones de drenaje, efectos de superficie y fuerzas capilares, la información primordial de la cual parte este sistema por su facilidad en aplicación son la granulometría y los límites de Atterberg. Sin embargo, dado que este sistema no aporta información de importancia como lo es la geometría de los granos, superficie específica, rigidez, diagénesis, densidad in-situ y grado de saturación, características del fluido intersticial, parámetros del estado crítico, y variabilidad espacial, se hace necesario el uso otros métodos que permitan establecer con mayor certidumbre el tipo de suelos presentes, como son ensayos mineralógicos.



Se describen enseguida los ensayos de laboratorio usados en esta investigación, para esta parte del análisis, de especial importancia en la práctica de la ingeniería geotécnica convencional

#### **3.6.1.1 Análisis Granulométrico**

Tal como se describe ampliamente en el estado del arte, aunque los análisis granulométricos son ensayos básicos para los suelos, de sus resultados parten muchos de los análisis posteriores que permiten establecer ensayos adecuados de resistencia y deformación, así como correlaciones semiempíricas de alta importancia para el análisis geotécnico; una inadecuada clasificación geotécnica de un material arcilloso puede llevar a costosos problemas de diseño posteriores. Teniendo en cuenta que se puede presentar una floculación de los suelos, solapando la existencia de suelos arcillosos en las muestras estudiadas, se procedió a efectuar un análisis de la distribución granulométrica a partir de tamizado. Para ello se usaron tamices o mallas por vía seca con diferentes aberturas, desde aberturas de 125 mm hasta aberturas de 0,075 mm (tamiz nº200). Para tamaños de partículas inferiores al tamiz No 200 se empleó la granulometría por sedimentación mediante el hidrómetro mecánico, aplicando el método D-422 de la norma ASTM, con el uso de hexametáfosfato de sodio en agua desmineralizada en proporción de 40 gramos de solución como agente dispersivo.

Es importante anotar que, para los objetivos de esta investigación, era de interés obtener resultados de tamaño de partícula por métodos no convencionales a nivel geotécnico, para su comparación con el análisis convencional usado en análisis geotécnico por tamizado e hidrómetro. Razón por la cual y con el fin disminuir incertidumbres en la clasificación final de los suelos estudiados, sin embargo, no se pudieron realizar ensayos adicionales para determinar el tamaño de partícula por difracción laser.

#### **3.6.1.2 Límites de Atterberg y ensayos para identificación de minerales en suelos arcillosos**

Los límites de Atterberg, convencionalmente usados para obtener los límites de plasticidad con el uso de la Carta de Casagrande, se usaron para obtener los límites Líquido, Límite Plástico e índice de Plasticidad, más que para su clasificación, dado que para suelos predominantemente finos

arcillosos y de origen volcánico o suelos alofánicos que cubren gran parte de la Región Andina en Colombia, el sistema de Clasificación con base en granulometría y Límites genera inconsistencia que deben ser resueltas con base en otros ensayos asociados al análisis químico de los suelos (Ruiz, 2006) como, por ejemplo, ensayos de mineralogía, la capacidad de intercambio catiónico y la conductividad eléctrica, de manera que permiten analizar la influencia de la composición del suelo sobre su comportamiento general, algunos de los cuales se aplican en esta investigación.

Polidori (2015), señala que los minerales de arcilla amorfos (como las alófanas y haloisitas), presentes frecuentemente en suelos derivados de cenizas volcánicas, desarrollan un comportamiento variado aun si son del grupo de las arcillas, aunque presentan características que hacen al suelo mejor para su uso en ingeniería, en comparación con aquellos que contienen minerales de arcilla cristalinos (caolinitas, illitas, montmorillonitas).

### **3.6.1.3 Difracción de rayos X -DRX**

Existen diferentes métodos para el análisis de la mineralogía y fábrica de suelos tal como lo establecen, en Yong & Sheeran (1973) y Mitchell & Soga (2005), esto por ejemplo a partir de diferentes partes del espectro electromagnético, algunos de los cuales han sido aplicados en esta investigación tanto para la caracterización física como microestructural. La composición mineralógica fue obtenida mediante difracción de rayos X (DRX) y Fluorescencia de rayos X –FRX, principalmente orientados a la identificación de minerales arcillosos y algunos elementos específicos que pueden ayudar a identificar la presencia de minerales arcillosos amorfos que no pueden ser identificados con la técnica de DRX. Los ensayos dirigidos a determinar la mineralogía de los suelos fueron realizados en el laboratorio de Geoquímica del SGC.

Para el análisis mineralógico se realizó difracción de rayos-X (DRX) mediante técnicas convencionales, de la muestra total y de la fracción <2µm. Los ensayos de difracción de rayos X se realizaron en un difractómetro marca Panalytical X'Pert Pro según los métodos propuestos por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2001), los cuales han sido utilizados y adaptados en el laboratorio de Geoquímica del SGC y el uso de los resultados para las muestras de interés fue autorizado por la Dirección de Laboratorio del SGC para el uso exclusivo de esta investigación y con fines académicos. El tratamiento de datos y análisis de resultados fue apoyado con el software de

adquisición de datos X'Pert Data collector, el software para la visualización de difractogramas X'Pert DataViewer y el software para la interpretación de difractogramas X'Pert HighScore Plus, además de una base de datos PDF -2 para la identificación de fases cristalinas con el cual además de la identificación se puede realizar una estimación cualitativa de la abundancia relativa de cada fase mineral con base en la intensidad de los picos. El ensayo y generación de resultados y difractogramas fue desarrollado por el profesional encargado de la técnica del Laboratorio de Geoquímica del Servicio Geológico Colombiano.

Una desventaja del método se presenta para materiales arcillosos como las alófanos en las cuales la detección de las alófanos por técnicas de rayos-X no es fácil, ya que el diagrama de difracción no muestra líneas de difracción sino algunas bandas, más o menos difusas y de fondo intenso, lo que hace muy difícil la interpretación de los diagramas de resultado (Ramírez-Builes, 2009). Estos minerales arcillosos o silicatos no cristalinos, aunque se pueden encontrar en una amplia variedad de suelos, se presentan particularmente asociados a los suelos derivados de cenizas volcánicas (Besoain, 1985).

Un aspecto muy importante para la aplicación de la técnica es la preparación de las muestras que se presenta en esencia en la Figura 3.6. En la figura 3.7. se presenta el procedimiento generalizado para la preparación de las muestras para la ejecución del ensayo.

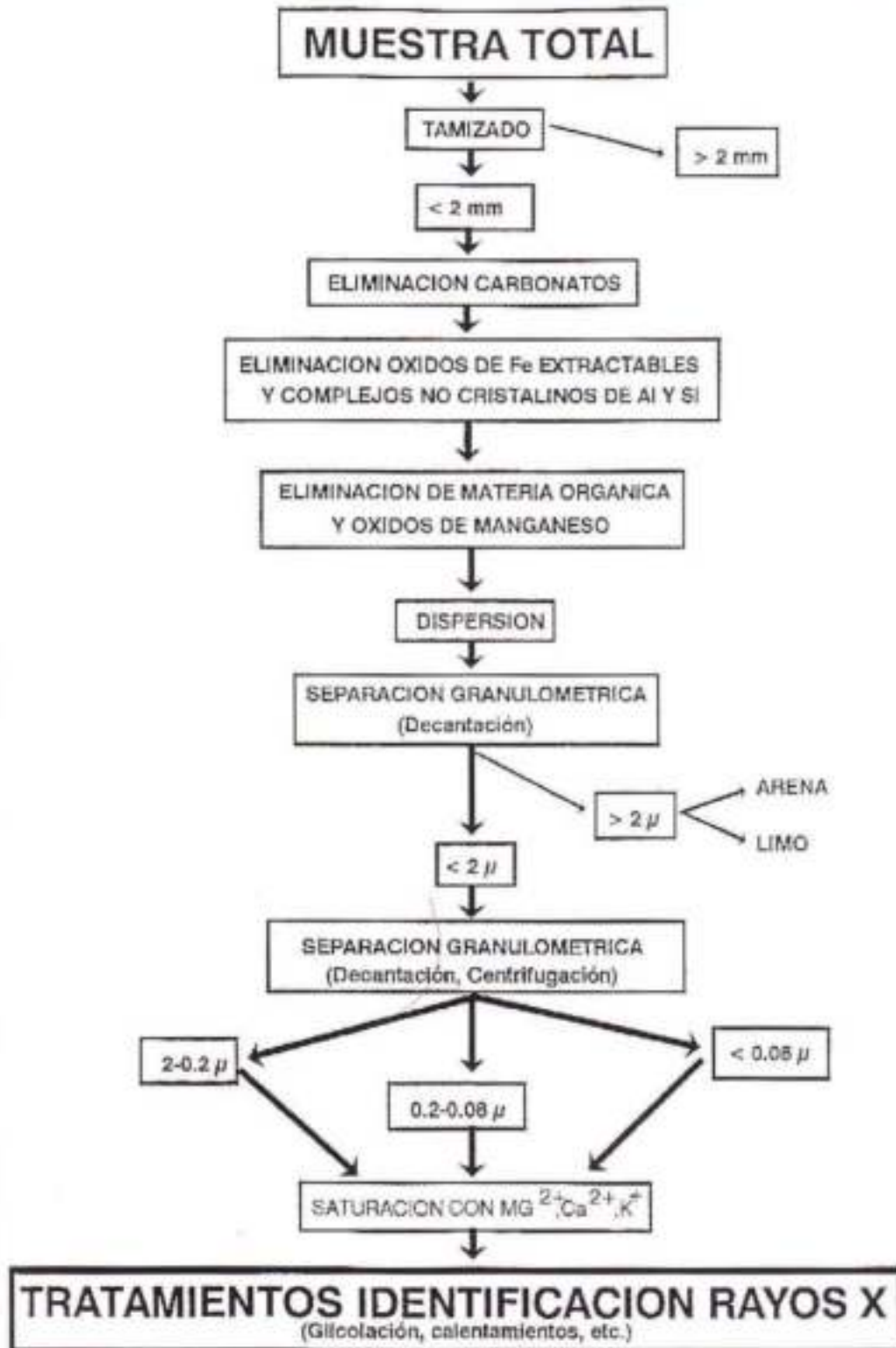
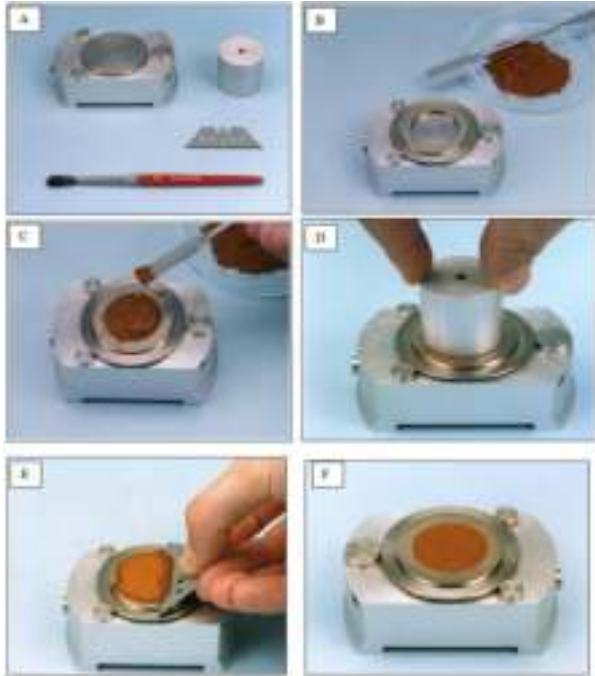


Figura 3.6 Esquema de preparación de muestras para la identificación de minerales de arcilla por difracción de rayos X – DRX (tomado de Justo y Morillo, 1999).



*Figura 3.7 Proceso de preparación de la muestra para leer en la plataforma spinner. A. Equipo de montaje. B. Disposición de la muestra. C. Depósito de la muestra en portamuestra. D. Uso del pistón para presionar. E: Eliminación del exceso de muestra. F. Muestra lista para colocar en el portamuestra*

Las bases teóricas de la técnica DRX y los criterios para identificación de minerales arcillosos y no arcillosos, así como los tratamientos necesarios para la identificación de minerales específicos pueden ser consultados en Moore & Reynolds (1989), USGS (2001) y Mitchell and Soga (2005) y Justo & Morillo (1999).

### **3.6.2 Fluorescencia de rayos X -FRX**

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos. La fluorescencia de rayos X también se utiliza para determinar el espesor y la composición de capas y recubrimientos. Esta puede analizar elementos desde berilio (Be) hasta uranio (U) en gamas de concentración de un 100 % a niveles sub-ppm.

Dado que mediante el ensayo de DRX algunos minerales arcillosos no cristalinos son difíciles de identificar con esta técnica, se usó también el ensayo de Fluorescencia de Rayos X- FRX, que es un método para la determinación de elementos mayores y algunos elementos menores y trazas que se aplicó para suelos y con el fin de determinar en este caso la determinación cuantitativa de elementos mayores (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, P, y M). Las muestras analizadas se prepararon a malla 200 (75mm) o fracción fina, posteriormente se secaron y calcinaron a  $1000 \pm 5^\circ$ , posteriormente la mezcla calcinada fue homogenizada y transferida al crisol de fusión Au/Pt y fundida posteriormente en la perladora para realizar posteriormente el análisis en el espectrómetro de fluorescencia de rayos X.

Los ensayos de FRX se realizaron con un espectrómetro Panalytical modelo AXIOS Minerals, que es un espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos X de onda dispersiva del Servicio Geológico Colombiano y fueron ejecutados por el técnico especialista del SGC; el uso de los datos resultantes para las muestras identificadas producto del ensayo fue autorizado para la elaboración de esta investigación por la Dirección de Laboratorio del SGC.

Las muestras se prepararon en forma de comprimidos a partir del material pulverizado o en forma de discos fundidos. Para un análisis rápido, la muestra homogeneizada puede medirse directamente. Las muestras se excitan con radiación X emitiendo los átomos presentes rayos-X (fluorescencia) de energía característica para cada elemento. Uno de los problemas más serios para el análisis por fluorescencia de rayos-X es la influencia de la concentración de los diversos elementos presentes en las muestras sobre la intensidad de una determinada línea de fluorescencia. Estas interferencias se denominan efecto matriz, Inter elementales o más específicamente efectos de absorción-reforzamiento. Se aplican diversos procedimientos matemáticos adecuados para tener en cuenta estos efectos.

Todos los ensayos fueron ejecutados en la fracción fina de las muestras separada por tamizado y decantación, de la misma forma que para los análisis con DRX. En el método de preparación y montaje utilizado se emplearon pastillas o comprimidos de KBr como célula de absorción (modo transmitancia) en un exceso de 1:100 (1 Mg de muestra por 100 Mg de KBr), de acuerdo con el procedimiento descrito por Van der Marel & Beutelspacher, (1976), el cual ha sido

utilizado y adaptado en el laboratorio de Geoquímica del SGC y el uso de los resultados fue autorizado para la elaboración de esta investigación por el SGC.

### **3.6.3 Ensayos para el análisis del comportamiento esfuerzo – deformación**

Dado que el objetivo principal de esta investigación es evaluar y analizar las posibles relaciones causales entre el comportamiento esfuerzo – deformación de suelos predominantemente arcillosos con su origen y ambiente de formación que puedan ser usados como elemento guía en la práctica de la ingeniería geotécnica convencional, se aplicaron diferentes ensayos de laboratorio para conocer la respuesta en resistencia y deformación de los suelos seleccionados en condiciones críticas con el fin de obtener parámetros de resistencia y deformación, que a su vez puedan ser usados como variables de entrada a algunos modelos constitutivos de forma prospectiva.

Este análisis prospectivo al ser comparado con la información directa de laboratorio soportarán una propuesta para validar el modelo constitutivo que mejor se ajuste al estado tenso – deformacional de los suelos en estudio; para la presente investigación se procederá a desarrollar el procedimiento para las zonas piloto seleccionadas y descritas a lo largo de este documento, que permiten su comparabilidad a nivel de comportamiento geotécnico esperable y el posterior análisis de los resultados respecto de su origen geológico.

Dado que uno de los objetivos de esta investigación es identificar cual modelo se ajusta mejor para representar el comportamiento esfuerzo – deformación de los materiales finos arcillo limosos en zonas tropicales respecto de su origen, que permita una modelación con elementos finitos basada principalmente en la dificultad en la obtención de los parámetros y sencillez en la aplicación, se presentan los análisis e identificación de variables de laboratorio usadas diferentes constitutivos seleccionados con base en su aplicabilidad para materiales finos arcillo limosos.

Las bases teóricas e información detallada para la implementación de los modelos constitutivos elásticos, elastoplásticos, elastoplástico viscosos se presentan en detalle en el capítulo 4 “Estado del arte y antecedentes”.

### 3.7 Trabajos de Oficina Fase 2

Los resultados del trabajo de campo, exploración geotécnica, ensayos de laboratorio, así como de la información secundaria existente evaluada y depurada se analizaron y se tomaron las variables requeridas el análisis de la respuesta en esfuerzo y deformación para el escenario actual de los materiales por zona piloto, así como su respuesta prospectiva dada por los modelos constitutivos usados para materiales finos en esta investigación, con el fin de establecer su aplicabilidad respecto de explicar en forma consistente el comportamiento esfuerzo –deformación en las diferentes zonas piloto en términos de su origen y evolución.

Las actividades de gabinete desarrolladas para esta investigación para la Fase 2 son las siguientes:

- a. Generación de perfiles estratigráficos para los sondeos definidos y construcción de un perfil litológico generalizado para desarrollo de ensayos de laboratorio.
- b. Evaluación y análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio de información primaria y secundaria existente por zona piloto, mediante análisis estadístico.
- c. Construcción de modelos geológicos 2D y perfiles geológicos por zona piloto con el uso de los programas QGIS versión 3.4.8. y AutoCAD 2018, perfil litológico tipo e identificación de variables geotécnicas tipo por zona piloto.
- d. Análisis de los resultados de los ensayos consolidados de información secundaria y primaria de laboratorio respecto de comportamientos especiales (colapso, sensibilidad y deformabilidad) y respuesta en resistencia y deformación en condiciones críticas para las tres zonas piloto respecto de su génesis.
- e. Identificación y uso de parámetros geotécnicos obtenidos aplicados a algunos modelos constitutivos aplicables para este tipo de suelos, que permitan caracterizan la respuesta mecánica del material en escenarios prospectivos, en este caso el suelo, ante fuerzas externas, la cual es descrita mediante las relaciones esfuerzo-deformación.



### **3.8 Discusión General**

Considerando los aspectos teóricos relevantes en el desarrollo de la investigación, así como los datos existentes y la información primaria obtenida de exploración directa, sus correlaciones y resultados, se analizaron los siguientes aspectos: distribución espacio temporal de los materiales de estudio en las zonas piloto analizadas, origen y propiedades geotécnicas básicas determinantes en la clasificación geotécnica de los suelos finos analizados; caracterización geomecánica de los suelos identificados por zona piloto y análisis de correlaciones geomecánicas entre zonas piloto evaluadas; aplicabilidad prospectiva de modelos constitutivos respecto del origen geológico de los suelos estudiados.

**CAPITULO 4**  
**ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES**

## **4 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES**

### **4.1 ESTADO DEL ARTE**

La acción de la dinámica natural sumada a la acción antrópica, en el entorno geográfico concreto, altera las condiciones del medio natural al realizar diferentes actuaciones; acciones antrópicas tales como excavaciones, explanaciones, aplicación de cargas estáticas y dinámicas al terreno, vertimientos, generan una respuesta que se asocia a la génesis y ambiente de desarrollo de los materiales geológicos. La respuesta del terreno, ya sean suelos o rocas, frente a esa alteración depende de su constitución y características, propiedades que están relacionadas con propiedades endógenas y exógenas de los materiales, las primeras relacionadas con su origen, evolución y las segundas relacionadas con su entorno de formación y acciones externas del medio que los han afectado.

La gran cantidad de variables que condicionan el comportamiento de suelos y rocas, fundamentado en variables endógenas y exógenas que contribuyen a su formación y evolución, hace complejo el análisis de los problemas relacionados especialmente con la deformabilidad que introducen las cargas y acciones exteriores, deformabilidad que puede llegar a una situación extrema de falla, en que el cambio de volumen aparente aumenta de forma extraordinaria al cambiar muy poco las cargas exteriores, quedando la resistencia definida por una gran deformabilidad y no por falla de partículas; es decir en lo referido al comportamiento esfuerzo – deformación de los materiales los problemas de flujo del agua en el interior del suelo, son en gran parte condicionantes de su respuesta ante cambios en las condiciones de carga; sin embargo, también el tamaño de las partículas que conforman los suelos, condicionan su comportamiento, así como sus características físico – químicas, que se traducen en cambios en resistencia y deformación importantes a nivel macro.

Estos comportamientos de los materiales están asociados a condiciones endógenas de formación y exógenas o condiciones ambientales a lo largo de su evolución. Es posible pensar que el conocimiento de estas condiciones en materiales de tipo arcilla, arcilla limosa o materiales geotécnicos finos de diferente origen geológico y ambiente de formación, permitirá establecer a nivel prospectivo, un primer paso en el conocimiento de los posibles comportamientos de estos

materiales ante diversas solicitudes a partir de análisis y correlación con las condiciones geotécnicas actuales y la definición y conocimiento de las zonas donde se localizan este tipo de materiales geológicos en Colombia, con base en una relación causal genética de los mismos. Esto se vuelve de mayor importancia especialmente en el momento actual de desarrollo tecnológico con el fin de establecer predicciones más acertadas con el uso de modelos constitutivos recientes y que puedan ser aplicables bajo ciertas condiciones de información de laboratorio que pueda ser relacionada con su génesis.

En este sentido se presenta en este capítulo en primer lugar una descripción general de las bases conceptuales desde la geología y geomorfología y la geomorfoclimatología que permite una adecuada identificación de las zonas piloto en evaluación, factor que cobra la mayor importancia para esta investigación, en segundo lugar, se presentará el marco conceptual alrededor del comportamiento geomecánico y los modelos constitutivos aplicables que se plantea usar dentro de esta investigación. Como aspecto de vital importancia se presentan al final de este capítulo los antecedentes referidos a la información de geología para ingeniería y geomorfología aplicada para el desarrollo del modelo geológico – geomorfológico existente por zona piloto.

#### **4.1.1 Aspectos de importancia para identificar el origen y evolución de los materiales arcillosos desde la morfogenética en las zonas piloto en evaluación**

La selección inicial de las zonas piloto de estudio se plantea a partir las variables geomorfológicas que determinan la génesis de un material: la morfogénesis, la morfoestructura, la morfocronología, la morfodinámica y la morfoclimatología. Con base en los trabajos efectuados por Carvajal ( 2002) e INGEOMINAS (2002), se tienen ambientes morfogenéticos alrededor de los cuales se debería efectuar el análisis genético de los materiales; para nuestro caso los ambientes morfogenéticos predominantes en las zonas piloto de estudio son:

1. **AMBIENTE VOLCANICO:** Asociado en las regiones donde predominan los procesos que generan geoformas volcánicas por la extrusión de materiales fundidos procedentes del interior de la tierra. Color recomendado el rojo de acuerdo con Verstappen & Zuidam (1992).

2. **AMBIENTE FLUVIAL:** Corresponde a las geoformas generadas por los procesos relacionados con la actividad fluvial. Se propone el color azul para estas regiones.
3. **AMBIENTE MARINO PROFUNDO Y COSTERO:** Determinado por las geoformas construidas por la actividad de las corrientes marinas y el oleaje costero del mar.

En la Tabla 4.1 se muestra la relación de procesos Geodinámicos y Categorías Geomorfológicas que se han usado como base para esta investigación.

Para analizar cualquier superficie del terreno e identificar las geoformas existentes, es necesario identificar y analizar los factores climáticos tanto actuales como pasados y su influencia en los procesos que actuaron o actúan en el modelado del paisaje de un área determinada; en este sentido los estudios geomorfológicos permiten un análisis integral desde diversos acercamientos: análisis de la morfoestructura, la morfodinámica, la morfocronología y la morfoclimatología. La morfoestructura (van Zuidam, 1986) incide en el modelaje del paisaje según dos condiciones: una Condición “Activa” que corresponde a los procesos morfogenéticos endógenos asociados tanto a la deformación y al fracturamiento tectónico (antiguo y reciente), como al vulcanismo que determina geoformas de configuraciones y dimensiones variables y una condición “Pasiva” que analiza las formas resultantes de los procesos o deformaciones tectónicas (activas e inactivas), expresadas en el relieve de la superficie terrestre, con dimensiones y configuraciones variables.

Desde el punto de vista de la geomorfodinámica se efectúa un acercamiento respecto de los procesos denudativos ocurridos tanto en el pasado como en el presente o aquellos que se puedan activar en el futuro. La morfocronología, está relacionada con la edad relativa de cada una de las geoformas del terreno, las cuales están caracterizadas por el período de su formación y su desarrollo posterior. Es esencial hacer una distinción entre las formas de edades diferentes, en particular, entre las formas recientes y aquellas heredadas de períodos anteriores, cuando prevalecían distintas condiciones climáticas. Dado que la cronología, y en particular la datación absoluta, es a veces difícil de establecer, las indicaciones para la edad deben ser flexibles. Finalmente, la morfoclimatología permite interpretar y analizar los procesos geomorfológicos comprendiendo la influencia de los climas actuales de la tierra. Así mismo es importante investigar y entender la influencia múltiple de los cambios climáticos y geomórficos ocurridos durante los

diferentes periodos que dieron origen a los materiales y los cambios que se han dado a través de su evolución.

Estos principios nos indican que para analizar cualquier superficie del terreno e identificar las geoformas existentes, es necesario identificar y analizar los factores climáticos tanto actuales como pasados y su influencia en los procesos que actuaron o actúan en el modelado del paisaje de un área determinada.

Los elementos formadores del clima que más se tienen en cuenta como factores influyentes en los procesos geomórficos formadores de una unidad geomorfológica son: temperatura, precipitación, la latitud, altitud y relieve (topografía). Dada la gran variedad de procesos que ocurren tanto en la zona superior (la atmosfera) como en el interior del suelo asociados a factores endógenos ( climáticos) como endógenos ( suelo) se vienen haciendo esfuerzos para desarrollar modelos acoplados que puedan representar el acople de los sistemas atmosfera – Suelos (Mora González, 2011) que parten de modelos ya desarrollados por Gens (2010) que incluyo el proceso de congelamiento del agua en su modelación, así como los efectos químicos en los suelos los cuales parten de leyes de comportamiento termo-hidro-mecánico.

La relación entre los factores climáticos y la meteorización fueron estudiados por Peltier (1973), quien estableció que a una temperatura determinada y bajo condiciones de precipitación media se establecen diferentes tipos de meteorización dominante. Igualmente, las variaciones climáticas influyen con diferentes grados de intensidad en todos procesos geomórficos conocidos. Es así como la rapidez y tipo de erosión pluvial, los movimientos en remoción en masa y la erosión son variables de acuerdo con la variación de los factores climáticos.

Conjugando los aspectos endógenos y exógenos de formación de los suelos y con el propósito de zonificar las variaciones propias de los factores que determinan el clima de una región se determinan las regiones morfogenéticas (Thornbury, 1960), o áreas en que bajo la influencia de condiciones climáticas actuales predominan procesos geomórficos particulares, los cuales le imprimen al paisaje características que lo distinguen de otras áreas desarrolladas bajo condiciones climáticas diferentes.

Las regiones climáticas se establecen de acuerdo al Modelo climático de Caldas Lang, el cual es el resultado de la unificación del modelo propuesto por Francisco José de Caldas en 1802 y Lang 1915; el primero aplicado al trópico americano, basado en los valores de temperatura con respecto a su variación altitudinal, estableciendo pisos térmicos en la Región Andina Tropical, y el segundo que relaciona la precipitación media anual y la temperatura media anual, cociente denominado Índice de Efectividad de Precipitación o factor de lluvia de Lang.

Con base en estas consideraciones en la Tabla 4.2 se relacionan las regiones morfogenéticas definidas por Louis Poltier, con las regiones climáticas definidas por Caldas - Lang (Eslava, 1993; Villota, 1997) con sus características climáticas, los procesos dominantes, las características morfológicas y las geformas asociadas para las zonas piloto de interés para esta investigación.

Tabla 4.1

Relación de procesos Geodinámicos y Categorías Geomorfológicas (adaptado INGEOMNAS 2005)

PROCESOS GEODINAMICOS (AGENTES)	PROCESOS MORFOGENETICOS	CATEGORIAS GEOMORFOLOGICAS MAYORES	CATEGORIAS GEOMORFOLOGICAS MENORES
INTERNOS (Endógenos)	MORFOESTRUCTURAL	Magmatismo (intrusión Volcanismo) Tectonismo: Compresión, distensión, Plegamiento, Fallamiento. Sísmicos	Cadenas montañosas (Cordilleras). Altillanuras (Llanos orientales) Piedemonte
Deriva Continental Tectónica de Placas			Gravens, Horst Valles Sinclinales Laderas estructurales Anticlinales Piedemonte Cordilleranos Escarpes, laderas irregulares Montaña de pliegue Escarpes de falla
EXTERNOS (Exógenos)	DENUDATIVO (Marino, Fluvial, Glaciar, Eólico, Lacustre, antrópico). (Degradacional)	Meteorización Erosión: fluvial, glaciar, hídrica y marina Fenómenos de Remoción en Masa. Excavaciones antrópicas	Valles Intramontanos (Valle Magdalena y Cauca) Altiplanicies Planicies Marinas Superficies Antrópicas
Agua, Hielo, Viento, Gravedad, fenómenos Meteorológicos, Corrientes Fluviales y Marinas, Lluvias Actividad biológica y del hombre.	AGRADACIONAL (Marino, Fluvial, Glaciar, Eólico, Lacustre, Antrópico).	Formación de: Suelos Depósitos (Residuales; coluviales, aluviales, glaciares, fluvio glaciales, marinos, lacustres). Actividad Humana y/o Biológica	Llanuras aluviales; Sabanas Llanuras costeras Llanuras lagunares Campos de duna Planicies antrópicas
			Planicies, colinas, mesetas y laderas denudadas Valles con cañones pronunciados Valles amplios antiguos Valles aluviales Canteras, taludes, canales Cerros de deyección Abanicos aluviales Abanicos Glaciar y Fluvio glaciares Llanuras de inundación Espigas Planos aluviales Terrazas Montículos de basura Planos de relleno



Tabla 4.2

Relación de las regiones morfogénicas y las regiones climáticas definidas por Peltier 1953 en Thornbury (1960) y Caldas – Lang en Eslava 1994 respectivamente para las zonas piloto en evaluación

REGIÓN MORFOGENÉTICA	REGIÓN CLIMÁTICA	TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C) – ALTITUD (msnm)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)	PROCESO DOMINANTE	AMBIENTE MORFOGENÉTICO	CARACTERÍSTICAS DEL PAISAJE
Moderada (Quindío y Barranquilla)	Muy Frio – Húmedo			Meteorización mecánica y química moderada	Ambiente fluvial predominante y Denudativo moderado:	Geoformas y procesos fluviales y denudativo
	Muy Frio - Superhúmedo			Erosión pluvial máxima	Efecto máximo de la acción fluvial	Vertiente suave
	Frio Seco	1 a 29	900 a 1500	Movimientos en masa moderados	Moderada acción de movimientos en masa	Suelos residuales
	Frío húmedo	500 a 3700			Leve acción de gelifracción	Crestas y valles
	Cálido Seco					Extensos depósitos aluviales y coluviales
Sabana (Sabana de Bogotá)	Frio - Húmedo			Meteorización química moderada		Geoformas de origen eólico y fluvial asociados
	Frio Seco	1 a 29		Erosión eólica máxima	Ambiente fluvial y eólico predominantes	Extensas zonas planas
	Templado húmedo			Erosión pluvial de moderada a máxima		Vertientes de suaves a fuertes
	Templado Seco		600 a 1300		Acción fluvial de máximo a moderado	Extensas áreas afectadas por la erosión eólica
	Cálido Seco	0 a 2000			Acción fuerte del viento	Extensos depósitos aluviales

Existen diversos modelos para la clasificación climática, entre ellos (Papadakis, 1962), (Koppen, 1918), (Terjung, 1966) basada en el bienestar humano, (Thorntwaite & Mather, 1955), (Eagleman & Lin, 1976) basada en temperatura y aridez, (Allue A., 1990) Lang, Caldas Lang, Caldas Modificado, UNESCO – FAO. Con base en estos modelos, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, entidad encargada de la cartografía en Colombia, al involucrar criterios climáticos dentro de la clasificación fisiográfica para la cartografía de suelos y zonificación física de tierras a nivel semidetallado o más general, adoptó una clasificación del clima que combina los pisos térmicos con las clases de humedad disponibles. Esto lo hacen utilizando los criterios de LANG y THORNTWAITE (IGAC, 1997) para clasificación cuantitativa mediante balances hídricos y definición de índices de humedad. Con base en esta propuesta, las zonas de estudio se enmarcan en las zonas que se presentan en la tabla 4.3. Dado que el alcance de esta investigación en el tema relacionado con el clima se direcciona a tener datos generalizados correlacionados por zona piloto.

*Tabla 4.3  
Clasificación del clima ambiental según metodología de la Subdirección Agrológica de  
Instituto Geográfico Agustín Codazzi)*

Tipo de Clima		Precipitación Anual (mm)	Relación Evapotranspiración potencial / precipitación	Altitud (m)	Temperatura (°C)
Símbolo	Denominación				
C - S	Cálido, seco (Barranquilla)	1000 - 2000	2 - 1	0 – 1000	> 24
M - H	Medio. Húmedo (Quindío)	1000 - 2000	1 – 0.5	1000 - 2000	18 - 24
F - S	Frío, seco (Algunos sectores de Sabana de Bogotá).	500 - 1000	2 – 1	2000 - 3000	12 - 18
F - H	Frío, húmedo (algunos sectores de Sabana de Bogotá).	1000 - 2000	1 – 0.5		

#### **4.1.2 La geotecnia aplicada para la caracterización del comportamiento de los materiales geotécnicos finos: arcillas y limos**

El comportamiento geomecánico de materiales, suelos o rocas, están controlados por factores fundamentales que se pueden representar en curvas de comportamiento de los materiales tales como: Origen del material, que se relaciona con su composición químico –mineralógica, fábrica y estructura, condiciones de Fase del material, condiciones de drenaje Interno y estado e historia de esfuerzos asociadas a las deformaciones.

La caracterización de los materiales geológicos deberá darse en términos de su composición mineralógica, procesos químicos y térmicos asociados, formación de la microestructura, que determinará su comportamiento mecánico (Torres, 2011), para finalmente abordar una caracterización macroestructural que aborda la caracterización física y mecánica de los materiales.

En este sentido, el origen de los materiales geológicos constituye uno de los parámetros cuya determinación y definición es fundamental para el área de la geotecnia; de acuerdo con el tipo de material de origen, se presentará una diferenciación en composición, cambios en propiedades índice y por lo tanto en propiedades esfuerzo – deformación. Es decir, las propiedades de las rocas y los suelos, así como la presencia y flujo de agua, se derivan de su origen y evolución, en particular de la manera como han intervenido a través del tiempo un conjunto de procesos como la cristalización, la gradación, la diagénesis, el metamorfismo, la meteorización en el caso de las rocas; o la gradación y la consolidación en el caso de los suelos, imprimiendo su carácter, tanto en su litología, estructura y posición en la secuencia estratigráfica, como en la condición física, mecánica y en el estado actual de esfuerzos.

El interés de develar esta relación viene desde los orígenes de la mecánica de suelos y las bases teorías desarrolladas por Terzaghi; el interés de Terzaghi se desarrolló alrededor de intentar relacionar el comportamiento se suelos y rocas con su origen y clasificación geológicos, objetivo que trato de desarrollar para obtener bases firmes para comprender el comportamiento del terreno, esto a través del análisis de una gran cantidad de datos existentes en el US Reclamation Service, sin embargo, fracasó en su propósito. Tal como lo expresa el doctor Antonio Gens Solé (2005) en el discurso presentado ante la Real Academia Europea de Doctores “... *su error fue intentar relacionar*

*el comportamiento de suelos y rocas con su origen y clasificación geológicos. Tal relación solo existe de manera muy indirecta y no es útil como base para desarrollar una ciencia geotécnica. En pocas palabras, el origen geológico del material no contiene suficiente información respecto a sus propiedades mecánicas”:*

Algunas variables que vienen de los estudios geológicos permiten establecer el origen y génesis de los materiales, lo cual determina el tipo de material presente, como se ha descrito previamente: la geomorfología, la geología, la geoquímica, la geofísica, así como los análisis geotécnicos propiamente dichos que derivan en la caracterización geomecánica final. Al respecto Pérez Rodriguez (1968) indica que *“la naturaleza y proporción de los minerales de arcilla presentes en el suelo dependen de la constitución de la roca madre de que el suelo procede y la intensidad de los procesos edafogenéticos por los que se forma el suelo, los cuales a su vez vienen condicionados por la clase de roca y las circunstancias climáticas, topográficas y ambientales”*, es decir la génesis y evolución del material.

Con base en lo expuesto, y tomando lo propuesto por Torres (2011), se plantea como marco de trabajo una relación causal entre la génesis de los materiales y su comportamiento geomecánico, esto respecto de las escalas espacio – temporales en las que se dan los procesos al interior de los materiales, pasando por la mega escala hasta llegar a la micro escala, entendiendo que las características físicas, químicas y mecánicas de los materiales controlan su respuesta ante los diferentes agentes de degradación del material (Figura 4.1).



*Figura 4.1 Relación de escalas espacio–temporales y aspectos claves para abordar el estudio de suelos finos predominantemente arcillosos (adaptado de Torres y Alarcón, 2011).*

### 4.1.3 Fábrica y Estructura

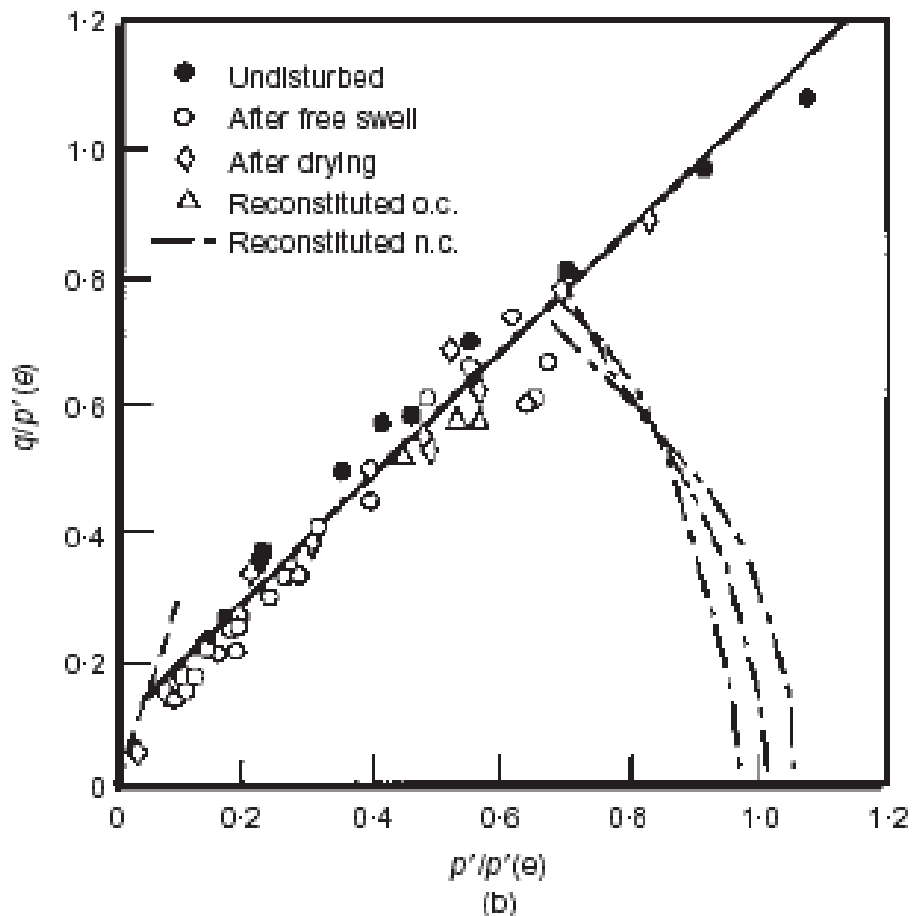
Para este documento, la fábrica hace referencia a la microescala, en donde se aborda el estudio de la estructura interna en la que se observa el arreglo de partículas o agregados y su relación con el cementante o bonding entre ellos. Los estudios de los materiales a nivel de la microescala se basan en los estudios químico – mineralógicos, que determinan la composición del material, el arreglo de microcomponentes y las acciones iniciales del agua en cuanto a los contactos entre partículas (efectos termo–hidro–químicos) (Torres, 2011). La fábrica tiene gran influencia en el comportamiento de los suelos, en especial en lo referente a la anisotropía que genera debido a la orientación de las partículas, la cual así mismo gobierna anisotropía en las propiedades geomecánicas.

Aunque la fábrica está relacionada con otras propiedades de los materiales, ella se puede inferir a partir de diferentes métodos directos o indirectos como, microscopía óptica y electrónica, difracción de rayos X, distribución de vacíos, velocidad acústica, dispersión dieléctrica – conductividad eléctrica, conductividad térmica, susceptibilidad magnética, análisis de tamaño y forma de partículas, etc.

El conocimiento de las características de la fábrica de los suelos permite su correlación con propiedades esfuerzo-deformación, propiedades hidráulicas o comportamientos contracto – expansivos entre otros. Sin embargo, dada la dificultad de establecer directamente las características de la fábrica, este parámetro estará incluido implícitamente en las propiedades físico-mecánicas mediante pruebas de campo, ensayos de laboratorio efectuadas en diversas direcciones respecto a la orientación predominante de las partículas (en suelos finos definida por la dirección de sedimentación principalmente) o estimadas a partir de correlaciones empíricas con propiedades índice u otros parámetros geomecánicos.

Comportamientos que podemos definir como especiales en materiales finos predominantemente arcillosos, tales como la sensibilidad, colapsabilidad, entre otros, se asocian a ciertas características de la fábrica; particularmente, las arcillas ultra sensitivas (Terzaghi et al., 1996) pueden ser muy afectadas por el rompimiento de la estructura, de tal forma que si no son perturbadas pueden ser relativamente fuertes, pero en el caso de ser cizalladas o sometidas a

condiciones que lleguen a romper los enlaces de la estructura inicial, pueden literalmente fluir como un líquido. La pérdida de la estructura en un material fino puede llevar a la reducción en la rigidez del material, envolventes de resistencia pico más bajas y disminución del índice de compresión primaria (Leroueil et al., 1979; Rampello & Amorosi, 1998) .En la Figura 4.2 se presentan algunas envolventes de resistencia pico para la arcilla de Tody ensayada bajo diferentes condiciones estructurales.



*Figura 4.2 Influencia de la estructura en la resistencia. Se presenta la variación en la condición de esfuerzos al someter el mismo tipo de material a diferentes procesos que modifican su estructura interna en esfuerzos normalizados. Tomado de Rampello (1998)*

La fábrica y estructura de un material puede ser conocida a través de algunos métodos como los que se presentan en la Tabla 4.4. En este caso de este estudio y dado que se requiere plantear un método sencillo de análisis que pueda ser aplicado con facilidad por los ingenieros, solo se usarán algunos de estos métodos con el fin de identificar elementos básicos de la fábrica de los materiales.

*Tabla 4.4*  
*Técnicas para el estudio de la fábrica de suelos*

<b>METODO</b>	<b>BASE</b>	<b>RASGO IDENTIFICABLE / ESCALA DE OBSERVACIONES</b>
Microscopía óptica	Observación directa de fracturas o secciones delgadas	Partículas tamaño limo o mayor, grupos de partículas de arcilla, orientación preferencial de partículas de arcilla, homogeneidad a pequeña escala, grandes vacíos, zonas de falla. Usualmente amplificación de hasta 300 x
Microscopía electrónica	Observación directa de partículas y fracturas (Microscopía electrónica scan MES, Microscopía electrónica de transmisión MET)	Resolución hasta 100Å, observación directa de partículas, grupos de partículas y vacíos; detalles de microfábrica.
Difracción de rayos X	Grupos de partículas planas de arcilla paralelas generan difracción más pronunciada que placas orientadas aleatoriamente	Orientación en zonas de varios milímetros cuadrados de área y varios micrómetros de espesor; adecuado para minerales simples de arcilla.
Distribución de tamaño de poros	(1) Incorporación de fluido (usualmente mercurio) (2) Condensación capilar	(1) Vacíos de aprox. 0.01 a 10 µm de diámetro (2) Máximo 0.1 µm de diámetro
Velocidad acústica	La velocidad es influenciada por el arreglo de las partículas	Anisotropía; medición de la microfábrica promediada sobre un volumen igual al tamaño de la muestra
Dispersión dieléctrica y Conductividad eléctrica	Variación de la constante dieléctrica y conductividad con la frecuencia	Evaluación de anisotropía; floculación y defloculación; medición de micro fábrica promediada sobre un volumen igual al tamaño de la muestra
Conductividad térmica	La conductividad térmica es influenciada por la orientación de partículas	Evaluación de anisotropía; floculación y defloculación; medición de micro fábrica promediada sobre un volumen igual al tamaño de la muestra
Susceptibilidad magnética	La variación en la orientación de la muestra respecto al campo magnético, influencia la susceptibilidad magnética	Evaluación de anisotropía; floculación y defloculación; medición de micro fábrica promediada sobre un volumen igual al tamaño de la muestra
Propiedades mecánicas		
Resistencia		
Módulos		
Permeabilidad	Las propiedades mecánicas reflejan la influencia de la fábrica	Micro fábrica promediada sobre un volumen igual al tamaño de la muestra; anisotropía; en algunos casos, rasgos de macro fábrica
Compresibilidad		
Expansión y contracción		

Desde la visión de la macro escala en los estudios geotécnicos, los suelos definidos como arcillas se definen a partir de dos propiedades básicas: su tamaño y plasticidad. Sin embargo,

muchos suelos identificados como limos bajo estas condiciones pueden corresponder a arcillas con una microfábrica especial. Algunos autores plantean que la microfábrica de las arcillas está determinada por tres tipos de elementos: partículas elementales, agregados de partículas y poros (Alonso et al., 1987) a partir de los cuales se pueden establecer tres tipos de microfábricas de suelo fundamentales (figura 4.3): a) microfábrica de tipo matricial, cuando las partículas elementales están distribuidas de forma homogénea; b) microfábrica en forma de agregados; cuando las partículas elementales están agrupadas como si fueran un grano de tamaño mayor; y c) una microfábrica de granos de arenas y/o limos con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directamente, sin conectores de partículas de arcilla. En el apartado (d) se muestra una partícula elemental que posee configuración paralela. A escala microscópica existen varias investigaciones sobre la estructura y fábrica de las arcillas (Collins & McGown, 1974; Grabowska-Olszewaska et al., 1984; Mitchell, 1993; Romero Morales, 1999) Algunos autores definen las arcillas desde el punto de vista petrográfico como un material sedimentario, atendiendo el factor genético respecto de materiales glaciares, residuales, volcánicos, lacustres, etc.

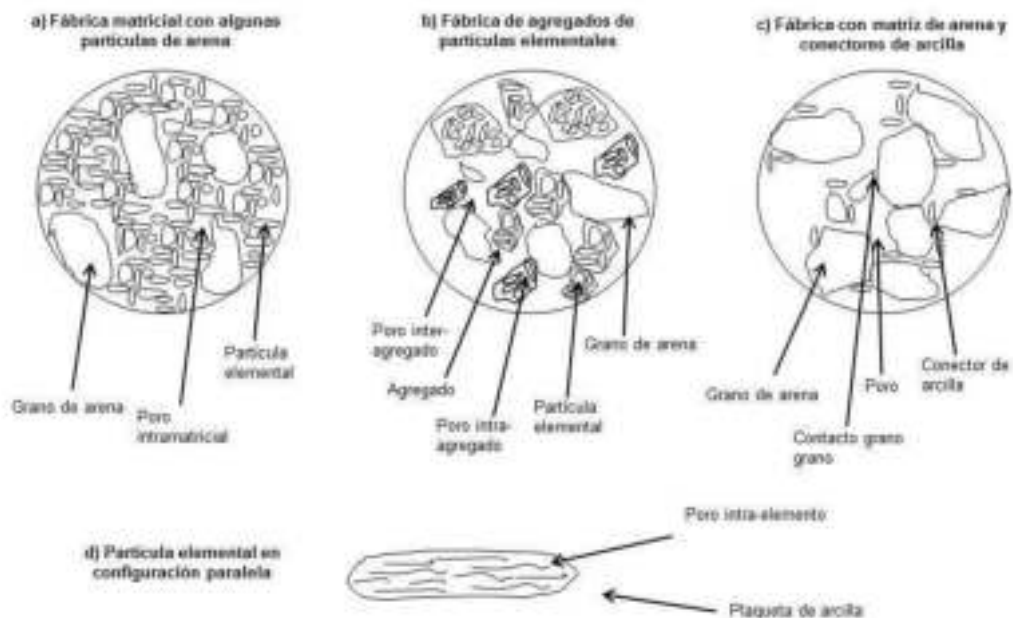


Figura 4.3 Tipos de microfábricas fundamentales del suelo (Alonso et al., 1987).



#### 4.1.4 Minerales arcillosos

En este sentido, respecto de los materiales de interés dentro de esta investigación, se pueden definir a las arcillas a nivel de macroescala y desde el punto de vista textural, a la fracción granulométrica de diámetro inferior a  $2\mu$ , tamaño propuesto por Atterberg y universalmente utilizado en la mecánica de suelos. Sin embargo, estas fracciones finas, que en algunos casos se han definido como coloides minerales o coloides de suelo, pueden contener numerosas sustancias cristalinas o no (amorfos); pero si bien esto ocurre, la mayoría de los minerales arcillosos se encuentran en la fracción menor de 2 micras. Sin embargo, la justificación del tamaño considerado para la arcilla no es muy clara, es así, como en muchos casos, minerales arcillosos floculados presentan tamaños superiores  $2\mu$ , pasando texturalmente a ser limos.

Desde un punto de vista puramente mineralógico, es importante entender que el comportamiento de los suelos finos está especialmente determinado por el contenido de minerales de arcilla, minerales que les dan las características químicas y físicas finales a los suelos geotécnicos finos, ya sea que estos se clasifiquen por su textura como arcillas o no. Los minerales arcillosos pueden ser cristalinos y algunos minerales amorfos, para los cuales se presenta mayor dificultad en su identificación, tal es el caso de las alófanas propias de los suelos volcánicos. Las alófanas, son sustancias conocidas desde hace mucho tiempo y son difíciles de caracterizar por la gran variabilidad que presentan en composición y propiedades. La dispersión y floculación de las arcillas en los suelos por la acción de electrolitos u otras causas tienen una gran influencia en las propiedades físicas de los suelos. Por ejemplo, arcillas floculadas engloban otras partículas de mayor tamaño como limos y arenas contribuyendo a dar al suelo una macroestructura granular que puede enmascarar un comportamiento de alta resistencia, pero fuertes deformaciones del suelo asociadas a su microfábrica.

Establecer una clasificación de los minerales identificados en las arcillas no es sencilla, e incluso no se tiene un acuerdo único respecto de los fundamentos de dicha clasificación; diferentes autores han propuesto clasificaciones tales como Brown, Greemm, Mackenzie, Henin y Caillerie (Pérez Rodríguez, 1968). Un mayor detalle de la Clasificación de Brown se presenta en el documento: "Constitución y Propiedades Físico-químicas de las arcillas de suelos del Valle del Guadalquivir" (Pérez Rodríguez, 1968).

De acuerdo al marco de trabajo espacio –temporal definido para esta investigación , en la macroescala, se analiza el sistema particulado en términos de sus fases composicionales, es decir la identificación de la matriz y la estructura que ofrece estabilidad mecánica al material ya que es en esta escala en donde se realizan los ensayos de laboratorio (muestras de mano – sistema particulado); sin embargo, es muy usual que en la práctica de la geotecnia se usen correlaciones semiempíricas para la definición de parámetros de resistencia y deformación de los suelos a partir de sus propiedades índice, las cuales usan estándares basados en la distribución del tamaño de las partículas, hecho bastante bien aplicable a suelos granulares, sin embargo, para suelos finos, en donde el contenido de minerales arcillosos es importante, muchas de las clasificaciones usuales que parten de la carta de Casagrande, por ejemplo, así como otras similares desarrolladas por diferentes autores (Polidori, 2003, 2007, 2009; Saito & Miki, 1975) no siempre permiten establecer la existencia de estos minerales arcillosos y por lo tanto no permiten conocer el comportamiento real esfuerzo – deformación esperable para este tipo de suelos (Moreno-Maroto et al., 2021);en este caso es importante tener en cuenta que la carta de clasificación de Casagrande genera resultados más próximos a la realidad cuando se trata de materiales con propiedades intermedias tales como las arcillas limosas y limos arcillosos ( CL\_ML, CH-MH)(Moreno-Maroto & Alonso-Azcárate, 2018; Moreno-Maroto & Azcárate, 2017).

Lo indicado previamente, es especialmente cierto en los casos de suelos de origen volcánico en donde se encuentran suelos tipo limo por su clasificación textural, pero atendiendo a sus características de plasticidad y composición tienen predominantemente minerales arcillosos; estos resultados se han evidenciado en algunos estudios efectuados en Colombia, tal como es el caso del trabajo “ *Estudio experimental de clasificación de suelos derivados de cenizas volcánicas en el suroccidente colombiano con el método USCS, el AASHTO y un nuevo método de clasificación de suelos*”, efectuado sobre materiales volcánicos del suroccidente del país en un trabajo desarrollado por la Universidad del Cauca (Guerrero & Cruz Velasco, 2018): “*los suelos MH (suelos 2, 4 y 5) tienen los mayores porcentajes de contenido de arcilla mientras que los CH (suelos 1 y 3) tienen los porcentajes de arcilla más bajos*”

En este sentido y dado que los métodos de clasificación de suelos finos AASTHO Y USCS son primordialmente texturales y de plasticidad, las clasificaciones de los materiales basadas en sus propiedades índice dan resultados muy similares, obteniéndose valores del límite líquido muy

similares y la misma clasificación USCS y AASHTO para suelos de origen diverso, sin embargo, si a partir de estas clasificaciones se realizan correlaciones con la resistencia y deformación, teniendo los suelos contenidos importantes de minerales arcillosos, se pueden generar interpretaciones inadecuadas de su comportamiento, que pueden llevar a la falla de los materiales y posteriormente de las estructuras que se construyen sobre ellos.

Ramírez-Builes (2009) expresa claramente que los métodos de laboratorio geotécnico y edafológico que actualmente se emplean en Colombia para estimar propiedades como la capacidad de intercambio catiónico y clase textural por dispersión mecánica (hidrometría), generan resultados con altas incertidumbres, especialmente cuando se trata de materiales en donde predominan suelos de origen volcánico con alta presencia de minerales arcillosos tipo alófanos e imogolita (amorfos), las cuales presentan características especiales y muy diferentes a los minerales arcillosos cristalinos, estos minerales arcillosos encontrados en sus estudios presentan complejos órgano-metálicos muy fuertes. Igualmente, otros estudios desarrollados por Laguna, (2007) encontraron que en algunas esmectitas provenientes de la Formación Honda al noroeste del Tolima en Colombia, para las muestras de origen natural, existen algunas especies (carbonatos y materia orgánica) que pueden actuar como aglomerantes que promueven la compactación de la fase esmectita, generando agregados estables de las partículas (habitualmente de tamaños de 2  $\mu$ ) con diámetros que sobrepasan la clasificación granulométrica de una arcilla y en el análisis convencional por hidrometría clasificando como limos.

Estos estudios reiteran la necesidad de incorporar otro tipo de análisis tales como Difracción por rayos X - DRX, esta técnica es fundamental para el estudio de los minerales, en especial aquellos en que se encuentran presentes diferentes fases cristalinas como las arcillas naturales. sin embargo, dado que esta técnica no puede analizar en detalle minerales arcillosos no cristalinos, se hace necesario el uso de técnicas adicionales tales como el ensayo de Fluorescencia de rayos X- FRX, que permite conocer los elementos constituyentes y su proporción en los minerales encontrados en el ensayo de DRX con el fin de tener un primer acercamiento a su naturaleza química (Laguna, 2007).

#### 4.1.5 Historia de esfuerzos y propiedades Esfuerzo – Deformación

Desde Coulomb y Rankine, quienes se interesaron en analizar situaciones en que el terreno se podía considerar que estaba en un estado de falla, se vio la necesidad de evaluar cuanto se va a deformar el terreno en respuesta a las cargas aplicadas sobre él (Gens, 2005). Cuando se estudian características respecto de la respuesta esfuerzo – deformación de los materiales geológicos relacionadas con su origen y el estado de alteración (meteorización) de geo-materiales debido a la acción de factores medioambientales como precipitación, temperatura, viento, humedad relativa y acciones combinadas de estos factores como erosión, la investigación se ha direccionado al componente químico y algunos aspectos físicos, debido precisamente a la dificultad de escalar tanto factores ambientales como la reacción esperada de los materiales (Tristancho & Caicedo, 2008).

En consecuencia, se requiere no sólo una identificación precisa del accionar de los factores medioambientales, sino una gran capacidad de desarrollo de formas idóneas de escalarlas no solo en laboratorio (macroestructura) respecto de las escalas de geo-material que allí se manejan, sino desde un análisis de relaciones causales entre las variables genéticas (mega escala) de los materiales que se pueden conocer a partir de la geología, la geomorfología y la composición química y disposición microestructural (microestructura). En la actualidad se hacen esfuerzos ingentes por investigar los efectos de las acciones ambientales en macizos rocosos, mediante la construcción de túneles y cavernas que sirvan como laboratorios a escala natural o simples tramos de ensayo, pero dadas las dificultades operacionales y altos costos involucrados se requiere más tiempo para lograr resultados satisfactorios y sobre todo aplicables a diversas geologías (Torres, 2011).

A nivel de macroestructura, se trata de replicar los esfuerzos en el interior de un suelo, los cuales son producto de la aplicación de cargas externas y debidas al peso propio del material, sin embargo, el sistema de esfuerzos debido a las cargas aplicadas suele ser bastante complicado. El sistema correspondiente al peso propio también suele ser complicado. En general todo cambio en el estado de esfuerzos de un material va asociado a una deformación, aunque la misma sea muy pequeña. En general, si el suelo fuera isótropo y linealmente elástico sería posible determinar las constantes elástica  $E$  (módulo de Young), y (Coeficiente de Poisson) a partir de pruebas sencillas, utilizando estas constantes para calcular la relación entre esfuerzos y deformaciones para otros tipos de pruebas. Sin embargo, este método tan sencillo no suele ser aplicable a los suelos. Por lo

tanto, se utilizan para estudiar el comportamiento esfuerzo – deformación bajo un tipo de carga específico.

Las pruebas convencionales desde el punto de vista mecánico, así como las más utilizadas para el estudio esfuerzo-deformación de los suelos son: compresión isótropa, compresión confinada (edómetro), compresión triaxial, corte directo; para la evaluación de la deformación a corto, mediano y largo plazo se evalúa el grado de consolidación de los suelos; sin embargo, al respecto del desarrollo y uso de equipos de laboratorio Terzaghi anotaba Gens (2005): *“Cuanto más simple y barato es el aparato, mejor expresa su objetivo y, por tanto, uno puede iluminar el proceso investigado, confirmar o rechazar hipótesis y formular nuevas, sin malgastar ni tiempo ni dinero. Instrumentos sensibles y costosos pertenecen a la fase en que comprendemos claramente el fenómeno natural y cuando es importante obtener cifras precisas. Cuando uno empieza los experimentos con aparatos costosos, se convierte en un esclavo del aparato, que en vez de establecer la verdad de una idea valiosa sirve solo para establecer un hecho – pero nunca para establecer una ley”.*, entendiéndose que el fin del uso de estos equipos, de acuerdo a Terzaghi no era una determinación más o menos precisa de las propiedades del terreno, sino comprender los rasgos fundamentales de su comportamiento mecánico para formular posteriormente, a través de un procedimiento de abstracción, leyes de comportamiento de validez general. Es en este sentido que se plantea el uso de ensayos y muestreo para esta investigación; si bien es muy alta la importancia la aplicación de técnicas de laboratorio que generen datos de importancia para entender el comportamiento esfuerzo -deformación de los suelos finos, el fin último es comprender los rasgos fundamentales de estos materiales que pueden ser asociados a su génesis y evolución y que puedan ser generalizados a partir de sus principales rasgos genéticos.

Aunque en los últimos veinte años se ha tenido un desarrollo muy grande alrededor de nuevos equipos para la medición de los estados de esfuerzo y deformación de los materiales, el uso de equipos convencionales, por su costo y aplicabilidad a los modelos constitutivos hasta ahora desarrollados sigue siendo de muy alto valor y es la que se plantea usar en esta investigación, con el fin de que su aplicación en el desarrollo de estudios de ingeniería geotécnica esté al alcance de los profesionales que hoy desarrollan los estudios que definen el desarrollo de obras y estructuras en el país.

Es importante anotar que el comportamiento geomecánico de los materiales, específicamente de los suelos, es producto de diferentes procesos acoplados que van desde la mega estructura, pasando por la macroestructura hasta llegar a la microestructura; por lo tanto las posibles relaciones del comportamiento esfuerzo – deformación de los suelos con su génesis y ambiente evolutivo requiere entender múltiples procesos acoplados Interescalares (desde la mega escala hasta la microescala) y procesos acoplados en la misma escala, por ejemplo la consolidación es un proceso acoplado de flujo y deformación a nivel de macroescala; es por lo tanto importante definir las posibles relaciones del comportamiento esfuerzo – deformación de los suelos con su génesis y ambiente evolutivo de forma simplificada en términos de procesos acoplados de muy alta complejidad.

Al respecto se tienen acercamientos importantes desde estudios en suelos parcialmente saturados y modelación de procesos acoplados, como la modelación física en centrífuga de la interacción suelo atmósfera (Tristancho & Caicedo, 2008), modelos analíticos y numéricos de estrés hídrico de las plantas (Rodríguez-Iturbe et al., 2001). Dado que estos estudios se han efectuado a diferentes escalas se genera una alta incertidumbre frente a las leyes de escalamiento a ser utilizada en la modelación de procesos acoplados tal como lo expresa (Mora González, 2011) en su tesis de maestría, direccionada al estudio y desarrollo de protocolos de modelación acoplada de procesos de interacción suelo atmosfera.

La modelación de acciones ambientales y su interacción con los suelos se investiga mediante el uso de tecnologías avanzadas como es el uso reciente de la centrífuga, en combinación con dispositivos que generan acciones como precipitación, luz solar, humedad relativa, etc. Se deben destacar ensayos realizados por un grupo de investigadores de la Universidad de Bari y la Universidad de Londres sobre diferentes tipos de arcillas plásticas altamente sobreconsolidadas del centro y sur de Italia (Calabresi & Scarpelli, 1985; Cotecchia & Chandler, 1997; Rampello & Amorosi, 1998; Ridley & Burland, 1996).

En Colombia se han desarrollado importantes esfuerzos por conocer el comportamiento en deformación de materiales arcillosos y su relación con los procesos de succión, tal como los trabajos realizados sobre las arcillas de la sabana de Bogotá por los investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña (G. E. Ávila, 2004); trabajos efectuados por la Universidad Nacional de

Colombia respecto del comportamiento en carga - descarga y humedecimiento - secado en rocas lodosas de los andes colombianos (Torres, 2011), y otros trabajos desarrollados desde 1991 y hasta años recientes con el fin de relacionar el comportamiento en deformación de materiales arcillosos ubicados en áreas de con origen Geológico bien diferenciado tales como al Glacis del Quindío, la Sabana de Bogotá y el batolito antioqueño. Igualmente, el Servicio Geológico Colombiano desarrolló estudios geotécnicos con toma de más de 1500 muestras en la Sabana de Bogotá para efectuar la caracterización geológico - geotécnica de los materiales de superficie y estudios geológico - geotécnicos con toma de muestras para el departamento del Quindío (INGEOMINAS, 2005).

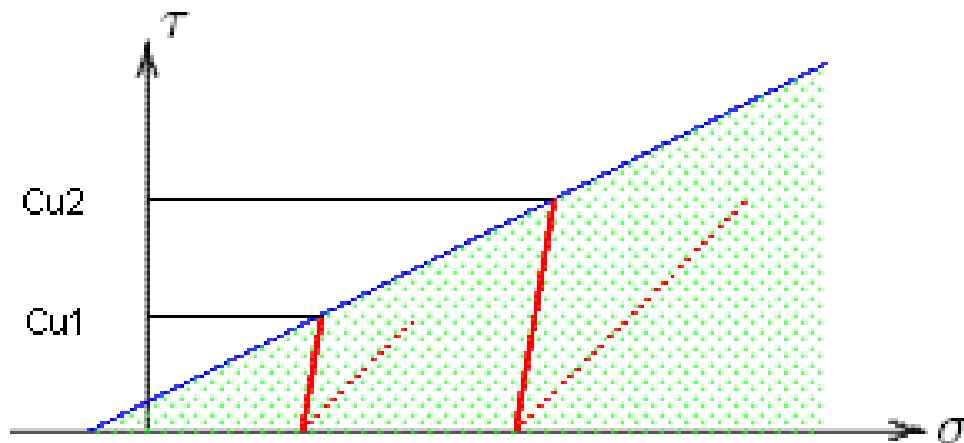
Aportes recientes provienen de investigaciones adelantadas por la Universidad Politécnica de Cataluña para determinar el efecto de la succión sobre la degradación de la resistencia al corte de la marga de Pamplona (Alonso & Pineda, 2006), de las arcillolitas del almacenamiento de residuos nucleares de Mont Terri y de los limos del valle de fondo plano de la presa de Albagues (Berdugo et al., 2010).

Otros grupos de investigación de la Universidad de Basilicata, la Universidad de Nápoles Federico II y la Segunda Universidad de Nápoles han estudiado la influencia de la composición del fluido de poros sobre la compresibilidad y la expansividad de materiales arcillosos naturales y reconstituidos (Di Maio, 1996; Picarelli et al., 2000) . Estos fenómenos están relacionados con la capacidad de intercambio catiónico de los materiales arcillosos en presencia de soluciones salinas y agua destilada.

#### **4.1.6 Condición de carga y resistencia al corte**

Con base en el principio de esfuerzos efectivos propuesto por Terzaghi et al., (1996), es importante entender que las condiciones de carga tienen implicaciones directas sobre el comportamiento esfuerzo – deformación de los suelos, producto del cambio de esfuerzos efectivos; sin embargo, el problema físico obedece a un fenómeno de flujo al interior de un medio poroso, de manera que deben analizarse de manera acoplada, ya que ambos procesos ocurren de manera simultánea y son dependientes del tiempo, como se puede apreciar en la teoría de consolidación (Mora González, 2011). Si bien, el estado crítico de resistencia de un suelo viene determinado por

las variables de resistencia en función de esfuerzos efectivos, el estado límite de resistencia en cualquier tipo de suelos está determinado por los parámetros de resistencia efectivos del material, así como la tasa de carga; de esta forma, cualquier trayectoria efectiva de esfuerzos que conduzca a este estado produce la falla (Figura 4.4)(Verrujit, 2001) , sin embargo, se pueden obtener valores mayores o menores de  $C_u$  en función de la presión de poros y en general de la trayectoria de esfuerzos generada, factores que se relacionan directamente con la microfábrica en los suelos finos predominantemente arcillosos.



*Figura 4.4 Esquema de trayectorias de esfuerzos. En línea punteada se ilustran trayectorias de esfuerzos totales mientras las líneas continuas muestran trayectorias de esfuerzos efectivos (Tomado de Verrujit (2001)).*

Los suelos arcillosos presentan un comportamiento viscoso, a causa de la dependencia de la resistencia con la tasa de cambio de las deformaciones. Ensayos triaxiales desarrollados a velocidad controlada (Berre & Bjerrum, 1973) muestran que la resistencia al corte de los suelos arcillosos crece de manera lineal con el logaritmo de la tasa de deformación, de manera similar otros estudios definen un parámetro que caracteriza el comportamiento viscoso del material al que denominan como índice de viscosidad (Mitchell et al., 1968; Murayama & Shibata, 1958), el cual se define como la relación potencial entre la resistencia al corte y la tasa de deformación o relación entre el coeficiente de compresibilidad secundaria y el coeficiente de compresibilidad primario; este índice fue presentado en función del límite líquido por (Krieg, 2000) en relación con el límite líquido del material (figura 4.5). Es importante anotar, que no se tienen datos específicos que puedan



generar resultados comparativos respecto de estos comportamientos en suelos arcillosos de diferente origen.

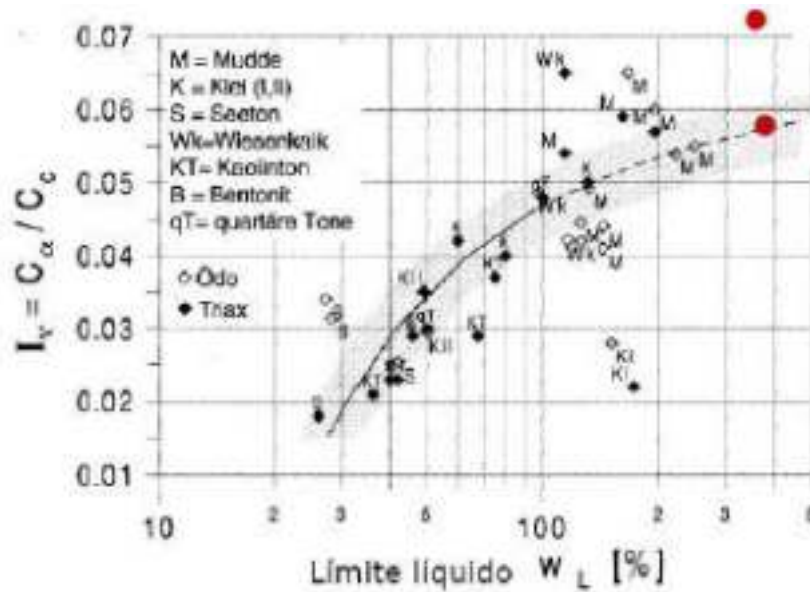


Figura 4.5 Valores del índice de viscosidad. Tomado de Krieg (2000)

La historia de esfuerzos a los cuales han estado sometidos los materiales se puede observar a través del esfuerzo de preconsolidación que establece la transición entre el comportamiento elástico y al comportamiento plástico donde se generan deformaciones irreversibles. En este sentido, las superficies de fluencia son función de los esfuerzos que permiten establecer la evolución de la plasticidad del material, a medida que los materiales plastifican desplazan estas superficies de fluencia de manera que extienden la zona en la cual el material presenta un comportamiento elástico (Mora González, 2011); lo anterior implica que si un determinado material es descargado se necesitaría cargarlo nuevamente (por lo menos hasta el valor de presión inicial) para que la trayectoria de carga sobrepase la superficie de fluencia y cause deformaciones plásticas (Mora & Moya, 2006); es por ello de alta importancia evaluar la relación de sobre consolidación (RSC).

La figura 4.6 muestra los posibles comportamientos de un material sobreconsolidado, en donde se observa en la zona 1 un comportamiento elástico, en la zona 2 un comportamiento no

lineal pero aún elástico luego de sobrepasar el límite elástico y la zona 3 en donde el material presenta un comportamiento vico-plástico.

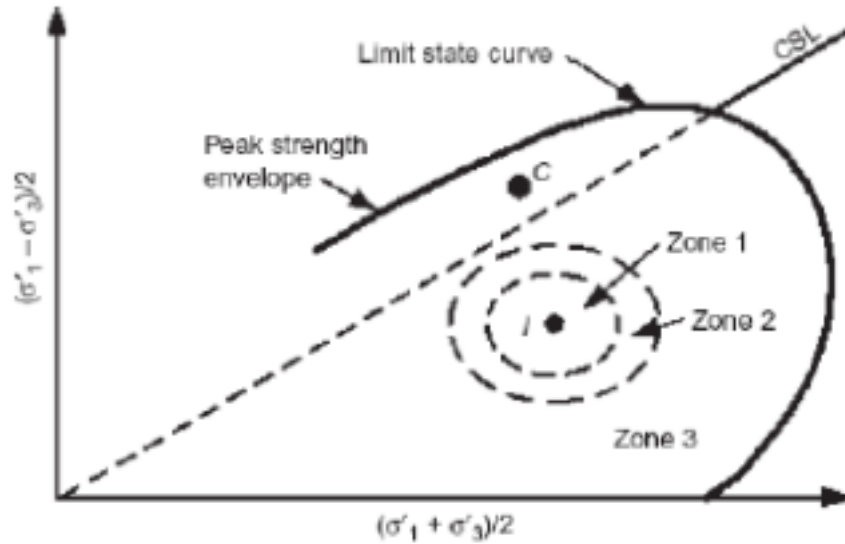


Figura 4.6 Elementos básicos del comportamiento de los suelos. Envolvente de falla de los suelo y zonas o rangos de comportamiento esfuerzo-deformación en que se puede encontrar. Zona 1 lineal y elástico, la zona 2 no lineal pero elástico, zona 3 visco-plástico. Tomado de Leroueil (2001)

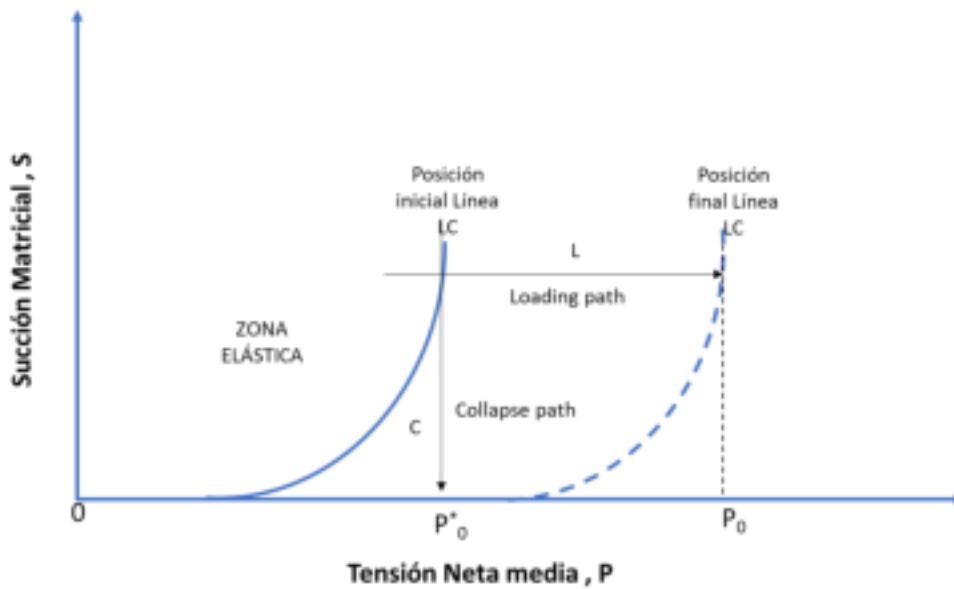


Figura 4.7. Trayectoria de carga (L) y colapso (C) llevando la LC a una misma posición final en el espacio p-s (tomado de Gimaraes, 2002)

Es importante tener en cuenta los efectos acoplados de la microestructura sobre la macroestructura y viceversa; en la Figura 4.7 se puede ver de acuerdo con lo desarrollado por Guimarães, (2002) como deformaciones de la microestructura pueden causar reorganizaciones del esqueleto macroestructural conduciendo a deformaciones volumétricas irreversibles que se reflejan en la variación de la superficie de fluencia macroestructural a través de un cambio en la presión de preconsolidación  $P_0$ . La curva LC se moverá según la macroestructura se abre (LC va a la izquierda) ablandamiento o se cierra (LC va a la derecha endurecimiento). No existe acoplamiento en sentido contrario, es decir deformaciones de la macroestructura no influyen en deformaciones en la microestructura (Gens & Alonso, 1992), es decir la microestructura es elástica y depende únicamente de los cambios de la tensión efectiva químicamente modificada ( $\Psi$ ).

En Gens and Alonso (1992) se considera que las deformaciones plásticas de la macroestructura son funciones de las deformaciones microestructurales y de la actual configuración de la macroestructura, dada por  $p/p_0$  en donde  $P$  es el esfuerzo medio aplicado y  $p_0$  es el esfuerzo de preconsolidación aparente para el valor de succión matricial actuando en el suelo;  $p/p_0$  representa la distancia del estado de esfuerzos actual a la superficie de fluencia de la macroestructura y tiene el mismo significado de la razón de sobreconsolidación de un suelo saturado isotrópicamente consolidado (Alonso et al., 1999). Valores de  $p/p_0$  cercanos a 1 indican una macroestructura abierta y colapsable y valores de  $p/p_0$  altos indican un alto grado de empaquetamiento del suelo (Guimarães, 2002).

De acuerdo con lo expuesto por Guimarães (2002) a valores bajos de  $p/p_0$  más densa se encuentra la macroestructura y por lo tanto se espera que un hinchamiento microestructural cause mayores deformaciones plásticas macroestructurales para pequeños valores de  $p/p_0$ . Igualmente, deformaciones plásticas de la macroestructura inducidas por retracciones microestructurales son mayores para valores de  $p/p_0$  cercanos a 1, que corresponden a una macroestructura más abierta. Estos son los principios básicos del modelo químico – mecánico para suelos expansivos propuesto expuesto por (Guimarães, 2002).

#### **4.1.7 Los Modelos constitutivos en la modelación del comportamiento de materiales geotécnicos arcillosos**

En los modelos de mecánica de suelos, en términos generales, se recurre a modelos constitutivos que consisten en expresiones para el flujo de masa de cada especie (generalmente aplicando la ley de Darcy o la ley Fick) y relaciones esfuerzo deformación que constituyen una amplia gama de modelos constitutivos que pueden ser lineales, elásticos, plásticos, elastoplásticos, viscosos, viscoplásticos, y así mismo incluir procesos de endurecimiento, dilatancia, e incluso estar acoplados con el flujo de agua y los efectos del cambio de humedad y succión del material Lade, (2005). Un ejemplo de lo anterior es la teoría de consolidación cuyo modelo conceptual y matemático es ilustrado en A.Gens (2010).

Los modelos constitutivos nacen como una respuesta para tener un principio-guía para la unificación del comportamiento del suelo o *“teoría que predijera cual sería el comportamiento del suelo bajo cualquier tipo de acción”*; para ello el marco teórico consistente que no violara las leyes básicas de la termodinámica se encuentra en la teoría de la plasticidad. En forma sencilla un modelo constitutivo es un procedimiento numérico que intenta describir el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de cargas externas e internas.

El modelo clásico de Mohr -Coulomb desarrollado en el marco de los modelos de plasticidad perfecta, es el modelo más ampliamente aplicado desde los inicios de la geotecnia; otros modelos constitutivos usados para suelos fueron basados en la teoría de la plasticidad perfecta aplicada a los metales (Helwany, 2007). El comportamiento de los metales difiere en gran medida del comportamiento de los suelos, ya que el suelo tiene características de no homogeneidad, no linealidad y anisotropía, como lo evidencian los trabajos realizados por (Burland, 1990; Cuccovillo & Coop, 1997; Leroueil & Vaughan, 1990; Liu & Carter, 2002; Mašín, 2007; Roscoe et al., 1958). Para simular mejor el comportamiento esfuerzo deformación del suelo han sido creados extensiones de los modelos para metales y otros nuevos modelos (elastoplástico, hipoplásticos, viscohipoplásticos). A pesar de lo expuesto anteriormente, no se ha podido desarrollar un modelo unificado con la capacidad de representar la totalidad de características que posee el suelo y que además sea aceptado por la totalidad de la comunidad científica.

En la actualidad, los modelos constitutivos para suelos han sido extendidos para introducir los efectos de la estructura y cementación del suelo. Esta extensión fue debida a las evidencias experimentales estudiadas por (Burland, 1990; Cuccovillo & Coop, 1997; Leroueil & Vaughan, 1990) que muestran diferencias en el comportamiento de los suelos reconstituidos y los suelos inalterados. Por esta razón varios investigadores han desarrollado nuevas formulaciones constitutivas tomando en cuenta el efecto de la estructura en el suelo. Entre las propuestas destacan las de(Liu & Carter, 2002), entre otras.

A continuación, se presentan las ecuaciones y conceptos básicos para introducir el efecto de la estructura a diferentes modelos constitutivos, los cuales fueron seleccionados porque requieren parámetros de fácil obtención a partir de ensayos convencionales de resistencia y deformación en laboratorio, además por presentar un manejo sencillo para la comunidad de profesionales en ingeniería geotécnica que deberá aplicar sus principios para el diseño y construcción de obras geotécnicas. Se incluyó el análisis del modelo francés por su facilidad en la aplicación de la ingeniería convencional a partir de datos básicos de caracterización de los suelos.

#### **a. Modelo de Mohr-Coulomb**

Es un modelo clásico para suelos y se define como el criterio de rotura de Mohr Coulomb. De forma sencilla, en función de los esfuerzos ( $\sigma$ ) normales y tangenciales ( $\tau$ ) sobre el plano de falla es la siguiente:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4.1)$$

Donde C es la cohesión,  $\phi$  el ángulo de fricción. La superficie de fluencia de Mohr-Coulomb es una pirámide de eje la recta hidrostática, cuya sección transversal (sobre el plano octaédrico) es un hexágono regular. En un análisis de deformación plana el modelo de Coulomb coincide con el modelo de Druker – Prager, desarrollado para materiales no metálicos como el hormigón, los suelos, etc.

Es un modelo elastoplástico, el cual es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo, que relaciona la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla Mohr - Coulomb. Este modelo ignora los efectos del esfuerzo principal intermedio y muestra predicciones conservadoras de la resistencia cortante del suelo; en general el modelo no representa el comportamiento elastoplástico progresivo y solo involucra dos elementos generales: la elasticidad perfecta y la plasticidad asociada al desarrollo de deformaciones plásticas o irreversibles; el modelo aplica para materiales normalmente consolidados.

El modelo exige cinco parámetros básicos de entrada: el módulo de Young  $E$ , la relación de Poisson  $\mu$ , la cohesión del suelo  $c$ , el ángulo de fricción interna, y el ángulo de dilatación  $\psi$ . Por lo tanto, el módulo de elasticidad se determina como el valor de la pendiente de la tangente a la curva esfuerzo - deformación del suelo sometido a ensayo triaxial, con presión de confinamiento de 100 kPa. En la Tabla 4.5 se exponen los parámetros de ingreso del modelo constitutivo de Mohr - Coulomb, para un suelo arcillo limoso o limo arcilloso.

*Tabla 4.5*  
*Parámetros constitutivos de Mohr – Coulomb (adaptado de Vintimilla, Ávila, 2004)*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Origen</b>
$E$ (kPa)	Módulo de Young	Ensayo triaxial
$\mu$	Coefficiente de Poisson	Relación del módulo cortante ( $G$ ) y nódulo de elasticidad ( $E$ ) 0.35
$c$ (kPa)	Cohesión	Ensayo triaxial
$\Phi$ (°)	Ángulo de Fricción	Ensayo triaxial
$\Psi$ (°)	Ángulo de Dilatación	$\Psi = \Phi - 30^\circ$

#### **4.1.7.1 Modelo de Cam – Clay**

Los primeros modelos elasto-plásticos de Estado Crítico fueron la serie de formulaciones Cam-clay desarrolladas en la Universidad de Cambridge por Roscoe y sus colegas. La formulación del modelo Cam-clay original como una ley constitutiva completa de tipo elasto-plástico incremental se encuentra en (Roscoe et al., 1958) y (Schofield & Wroth, 1968). Posteriormente, Roscoe y

Burlandl propusieron el modelo Cam-clay modificado y su extensión a tres dimensiones. Las primeras implementaciones numéricas de estos modelos en programas de elementos finitos datan de los primeros años de la década de los 70.

Cam Clay es usado para predecir la respuesta ante solicitaciones en las cuales las deformaciones plásticas se presentan indefinidamente sin cambio de volumen o esfuerzos efectivos o estado crítico. Este estado se presenta cuando la curva esfuerzo – deformación se convierte en asintótica al eje en el cual se representan los esfuerzos. El modelo simula el comportamiento de un suelo con un cierto grado de idealización (Roscoe et al., 1958); posteriormente (Roscoe & Burland, 1968) proponen el modelo Cam-clay modificado que corrige algunos defectos importantes del Cam-clay original, identificándose esta familia de leyes como modelos de estado crítico (Gens, 2005). El modelo Cam – Clay se puede resumir en la siguiente forma; tradicionalmente las trayectorias de esfuerzos de un ensayo drenado y de un ensayo no drenado son muy distintas, sin embargo, usando las leyes de normalización del modelo Cam-clay, se comprueba que las formas de las trayectorias normalizadas son de hecho iguales y responden a un comportamiento único del material, por lo tanto no se requieren leyes de comportamiento separadas para estos casos, esto se resumen en la denominada Superficie de Estados Límite (State Boundary Surface); esta superficie delimita la región de los estados posibles del material, los estados representados por puntos en el exterior de esta superficie no son admisibles. Todos los rasgos principales del comportamiento de los suelos pueden derivarse del gráfico presentado en la Figura 4.8, aplicando los principios y las reglas del modelo Cam-Clay.

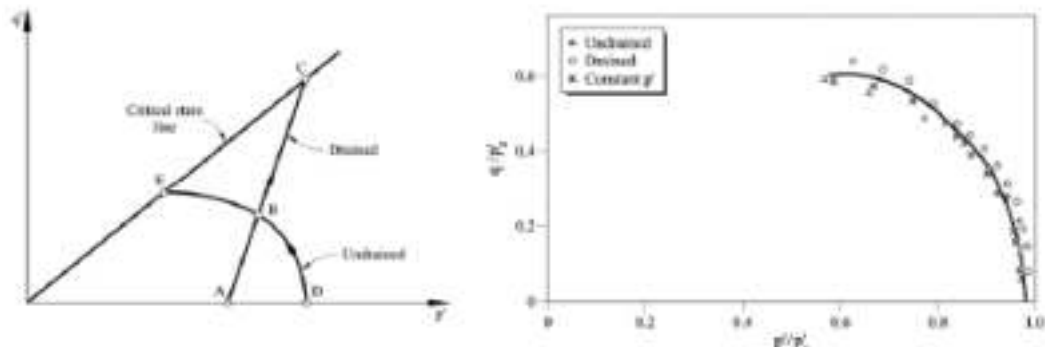


Figura 4.8. Trayectoria de tensiones para un ensayo drenado y un ensayo no drenado (izquierda). Utilizando las reglas del modelo Cam-clay, todos los ensayos, drenados y no drenados, trazan una misma trayectoria normalizada (derecha). Datos de ensayos sobre caolín de Balasubramaniam (1969) (tomado de Gens, 2005)

El Cam-clay original está basado en el trabajo de Taylor, en el cual se propone que los factores contribuyentes a la resistencia del suelo son la fricción entre partículas generada durante un proceso de carga y el interlocking. El interlocking es la interconexión entre partículas y causa dilatación o contracción del suelo dependiendo de si este se encuentra en su estado denso o suelto. La rata con la que el suelo se dilata o se contrae es una medida del interlocking. La introducción de este factor fue importante para la refutación de la ecuación de Mohr Coulomb. Schofield determinó que era el interlocking, y no la cohesión, el causante de la unión entre partículas y de los esfuerzos pico en ensayos de corte.

Las predicciones del modelo Cam-clay deben tener en cuenta el tipo de ensayo triaxial al cual fue sometida la muestra, es decir si este fue drenado o no drenado. Las muestras de arcilla extraídas para este trabajo fueron sometidas a triaxiales CD, consolidados – drenados (Figura 4.9). En este caso se debe mantener una relación entre el esfuerzo efectivo y el desviador constante.

$$\partial q = 3\partial p \tag{4.2}$$

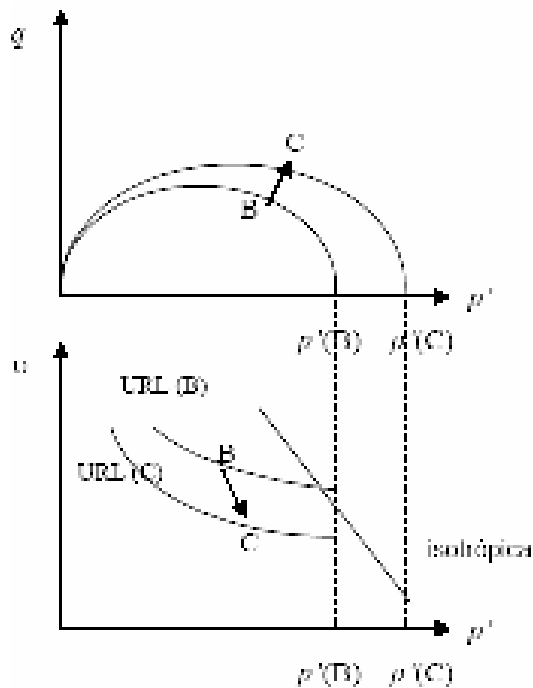


Figura 4.9 Ensayo triaxial CD (Tomado de Chacón, 2004)



Tabla 4.6  
Parámetros constitutivos de Cam-clay (adaptado de Chacón, 2004)

Parámetro	Descripción	Origen
$w$	Humedad Natural	Humedad
$G_s$	Gravedad Especifica	$G_s$
$e_0$	Relación de Vacíos Inicial	$e = \frac{w \gamma_s}{S_r \gamma_w}$
$\mu$	Módulo de Poisson	Triaxial
$\varphi_c$	Ángulo de Fricción Crítico	Triaxial
$l$	Pendiente de Línea NC	Consolidación
$k$	Pendiente Línea SC	Consolidación
$M$	Constante de Fricción EC	Triaxial
$N$	Ordenada Línea NC	Consolidación
$\Gamma$	Ordenada Línea EC	Consolidación

#### 4.1.7.2 Modelo hiperbólico Duncan - Chang

El modelo hiperbólico fue propuesto inicialmente por (Kondner & Zelasko, 1963), posteriormente fue presentado en forma ajustada por (Duncan & Chang, 1970), el que parte del supuesto de que las curvas esfuerzo-deformación del suelo pueden aproximarse a una curva hiperbólica que relaciona el esfuerzo desviador con la deformación axial. Los parámetros constitutivos que se requieren para trabajar con el modelo se encuentran en función del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo cortante, los cuales pueden ser obtenidos por ensayos de compresión triaxial.

Los parámetros básicos de ingreso para el desarrollo del modelo son: el módulo de elasticidad inicial ( $E_i$ ), módulo tangencial de elasticidad ( $E_t$ ), el módulo de carga y descarga de elasticidad ( $E_{ul}$ ), coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), cohesión ( $c$ ), ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ), módulo de carga inicial ( $K$ ), exponente de rigidez inicial ( $n$ ), coeficiente de falla ( $R_f$ ), esfuerzo de confinamiento y presión atmosférica ( $P_a$ ), módulo de descarga y recarga ( $K_{ur}$ ), módulo volumétrico ( $K_b$ ), exponente de módulo volumétrico ( $m$ ) y módulo tangencial ( $E_t$ ).

Este modelo se ha venido usando gracias a que los parámetros se obtienen directamente del ensayo triaxial, sin embargo, este modelo no puede distinguir entre los ciclos de carga y descarga.

A manera de resumen la tabla 4.7 muestra las variables requeridas por el modelo y los ensayos necesarios para encontrarlas.

*Tabla 4.7*  
*Parámetros constitutivos de modelo hiperbólico Duncan - Chang (adaptado de Vintimilla, Avila 2004)*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Origen</b>
c (kPa)	Cohesión	Ensayo Triaxial
	Ángulo de Fricción	Ensayo Triaxial
K	Módulo de carga inicial	Curva $E_i$ vs $\sigma_3$ - Ensayo Triaxial
N	Exponente de rigidez inicial	Curva $E_i$ vs $\sigma_3$ - Ensayo Triaxial
$R_r$	Relación de falla	Valor por defecto
$K_b$	Módulo de carga inicial	Curva $B_m$ vs $\sigma_3$ - Ensayo Triaxial
$M$	Exponente de rigidez inicial	Curva $B_m$ vs $\sigma_3$ - Ensayo Triaxial
$K_{ur}$	Módulo de descarga y recarga	Curva $E_{ur}$ vs $\sigma_3$ - Ensayo Triaxial

#### **4.1.1.7.3 Adaptación al modelo francés**

La importancia en la ingeniería geotécnica del concepto de la confiabilidad en el diseño es planteada abiertamente por (Raba Moyano & Caicedo, 2012), para lo cual plantea la importancia de tener modelos correlacionables que permitan cuantificar de manera científica algunas propiedades que son de fácil manejo y bajo costo en trabajos de Ingeniería Geotécnica, con constantes o parámetros resultantes de ensayos especializados de campo y laboratorio que son de muy alto costo y en general de muy difícil ejecución, esto dado que en la práctica común de la ingeniería el desarrollo y ejecución de ensayos de resistencia y compresibilidad es mínimo. En este sentido el

método francés para la representación simplificada del comportamiento de suelos blandos, constituye una herramienta valiosa que permite interpretar físicamente ensayos y propiedades índice de los suelos y relacionarlos de alguna forma con ensayos de resistencia y compresibilidad; con la ayuda de esta herramienta se adquieren criterios de juicio y herramientas de trabajo importantes con el fin de evaluar en un proyecto la varianza de las diferentes constantes de suelo en función de la variación de los parámetros de estado.

Este método plantea correlaciones entre el Limite líquido y el Índice de plasticidad, el Limite líquido y el Coeficiente de compresión, el esfuerzo efectivo y el Índice de Plasticidad, Índice de consistencia y el Índice de Plasticidad, el Índice de Plasticidad y el Angulo de fricción, la resistencia al corte no drenado y el Índice de Plasticidad, el Índice de Plasticidad y el Índice de Viscosidad.

## **4.2 ANTECEDENTES**

### **4.2.1 Unidades Geológicas Superficiales y Geomorfología**

#### **4.2.1.1 Sabana de Bogotá**

- **Unidades Geológicas Superficiales**

Las unidades geológicas superficiales o materiales geológicos que se presentan en superficie en la Sabana de Bogotá, independientemente de su edad, son tomadas del documento POMCA de la cuenca del río Bogotá (CAR, 2018) y del documento “Geología para Ingeniería para la Sabana de Bogotá”, desarrollada dentro del “Proyecto Compilación de la Información Geomecánica”, elaborado por INGEOMINAS, (2004). Con base en este documento se presenta una descripción de los materiales geológicos de superficie presentes en Sabana de Bogotá, con base en la propuesta metodológica que se desarrolló en este mismo proyecto, clasificando los materiales en suelos y rocas respecto de sus propiedades geológicas y algunas propiedades geotécnicas básicas que le imprimen un comportamiento geomecánico a dichos materiales.

En este sentido es importante anotar que para la caracterización y clasificación de los suelos se tienen en cuenta: el origen, composición litológica, textura, consistencia, estructura, densidad,

espesor y humedad. Las unidades de suelos que afloran en la Sabana de Bogotá, de acuerdo con su origen, textura y granulometría se clasifican en 4 grupos: residuales (Srs), transportados (St), coluviales o translocados (Str) y depósitos antropogénicos (Stra). Igualmente, cada uno de los grupos se subdividen en subgrupos. En la Tabla 4.8 se presenta un consolidado de las Unidades Geológicas de Superficie tipo suelo que de interés en la Sabana de Bogotá asociadas al origen lacustre o fluvio lacustre.

*Tabla 4.8*  
*Unidades Geológicas Superficiales – UGS de interés geológico para esta investigación en Sabana de Bogotá (fuente propia)*

<b>Suelos transportados (St)</b>	
<p>Son los materiales resultantes de la acción dinámica de los procesos geomorfológicos y de los agentes naturales como la gravedad, los sismos, los medios de transporte como el agua, el hielo, y depositados o llevados a los sitios que ocupan actualmente. De acuerdo con los agentes y ambiente de formación (génesis u origen), composición litológica, granulometría, forma, tamaño de los componentes, posición geográfica o relacionados con o sin la topografía actual o con la cuenca tectónica de la sabana, los materiales transportados se clasifican en las siguientes clases de depósitos: aluviales (Stf), lacustres (Stl), fluvio lacustres (Stfl), fluvio torrenciales (Stft), glaciares (Stg) y fluvio glaciares (Stfg)</p>	
<b>Depósitos lacustres (Stl1)</b>	<b>Depósitos fluvio lacustres (Stfl).</b>
<p>Presentan una morfología en general plana a ligeramente inclinada y corresponden a los materiales formados por la sedimentación de un antiguo lago que cubrió los terrenos de la parte central de la denominada sabana de Bogotá. Están constituidos principalmente por arcillas y limos; de color gris, amarillo pálido y naranja por meteorización, de consistencia blanda. Hacia los márgenes de la cuenca se presenta un incremento de intercalaciones lenticulares de arcillas orgánicas, turba, arcillas arenosas, arenas arcillosas,</p>	<p>Presentan una morfología de plana a ligeramente inclinada y en sectores ligeramente aterrazados. Corresponden a los materiales acumulados en los bordes de las laderas de las partes alta, media, y baja de la sabana y valles (cuenca baja) de los ríos: Bogotá (Cuenca alta) y cuencas bajas de los ríos Teusacá, Frío, Subachoque, Bojacá y Tunjuelito. De acuerdo con su composición litológica, granulometría y posición geográfica de la cuenca</p>

- **Aspectos Geomorfológicos**

En la sabana de Bogotá se han identificado Unidades y Subunidades de los ambientes morfogenéticos, morfoestructural, denudativo, fluvial – lagunar, glaciar – periglaciar y antropogénico. Mientras las unidades geomorfológicas están definidas con criterios genético, morfológico y geométrico en función de los procesos geomorfológicos específicos que las conforman, ya sea de carácter erosivo o de acumulación; las subunidades están definidas

fundamentalmente por los contrastes morfométricos que relacionan el tipo de roca o sedimento, tanto con la correspondiente topografía del terreno como con los procesos dinámicos activos prevalecientes. La evolución geomorfológica de la sabana de Bogotá está asociada a la interrelación de procesos endogenéticos de plegamiento y fallamiento estructural con influencia de procesos exogenéticos relacionados con los cambios climáticos tanto de carácter mundial como locales, determinados por los levantamientos de la cordillera oriental durante su evolución geológica.

La Sabana de Bogotá como se ha indicado previamente, se encuentra ubicada geomorfológicamente en la morfogeoestructura correspondiente al Sistema montañoso orogénico Andino que bordea el cratón Guayanés por su parte noroccidental. Este sistema montañoso ha sufrido y debe su conformación a procesos de acumulación y levantamientos orogénicos y epirogénicos, con plegamientos asociados localmente con fuerte metamorfismo e intrusiones graníticas que han determinado a través de su historia desde el Paleozoico la conformación del relieve actual (van der Hammen, 1998), la antigua laguna que formó la sabana de Bogotá se fue secando periódicamente hace aproximadamente 30.000 años, quedando remanentes en la parte sureste de la sabana. Previamente se presentaron varios eventos volcánicos en la cordillera central, cuyas cenizas se acumularon tanto en las zonas de ladera como en la laguna, cuyo resultado es la formación de suelos con altas cantidades de humus y de diatomitas respectivamente. En la Tabla 2.1 del capítulo 2, se presentan las unidades lito estratigráficas de interés para Sabana de Bogotá y en la tabla 4.9 se presentan las unidades y subunidades geomorfológicas de interés para esta investigación; igualmente en la Figura 4.10 se presentan el mapa de UGS y el mapa de Unidades y Subunidades geomorfológicas para Sabana de Bogotá.

Tabla 4.9

Consolidado Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en Sabana de Bogotá (adaptado SGC, 2005).

<b>3. Geoformas de origen fluvial y lagunar</b>		
<p><b>Las geoformas de origen fluvial y lagunar están originadas por el efecto erosivo y acumulativo de las corrientes de los ríos y la sedimentación de materiales en cuencas restringidas respectivamente. Estas geoformas están definidas principalmente en la parte central de la sabana de Bogotá, y particularmente asociadas a la acumulación de sedimentos de los cursos de los ríos Bogotá, Subachoque, Siecha, Teusacá, frío y Tunjuelito</b></p>		
<p><b>Planicies y deltas lacustrinos (Fpla):</b> Planicies extensas de aspecto aterrazado y morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por escarpes de 2 – 20 m de altura. Se constituye de arcillas grises con locales intercalaciones de arenas finas y delgados niveles de gravas y turbas en capas paralelas producto de la acumulación de materiales transportados por las corrientes locales hacia la cuenca ocupada por el antiguo lago de la Sabana de Bogotá. Espesores de 20 - 300 m. Estas geoformas son las de mayor expresión en la sabana de Bogotá con una cobertura de aproximadamente 2700 km<sup>2</sup>. Son de morfología plana y de aspecto aterrazado, suavemente ondulada de 3º - 5º de inclinación y con forma lobulada o de abanico principalmente en la desembocadura de los grandes cursos de agua que entregaron sus aguas en la antigua laguna de la sabana de Bogotá.</p>	<p><b>Terrazas fluviales de acumulación (Ftar Ftas– Fta):</b> Superficies planas y suavemente inclinada (2º - 3º) paralela a los ríos a los cuales limitan con escarpes de diferente altura y espesor. Se han formado por la incisión de antiguas planicies de inundación como consecuencia de cambios en el nivel de base de los ríos, por cambios eustáticos ó climáticos, y movimientos tectónicos. Se constituye de material aluvial con gravas arenas y limos y de acuerdo con su edad relativa pueden ser recientes, subrecientes o antiguas: Ø Terrazas fluviales actuales o recientes (Ftar), Ø Terrazas fluviales de acumulación subreciente (Ftas), Ø Terrazas fluviales de acumulación antiguas (Fta), Ø Terrazas fluviales por erosión (Fte)</p>	<p><b>Planicie o llanuras de inundación (Fpi):</b> Franja de terreno plana baja de morfología ondulada de 0.05 – 5 km de extensión, eventualmente inundable. Se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes de terraza. Se constituye de 3 - 5 m de arcillas y limos producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial. Se incluyen los planos fluviales menores en formas de “U” o “V” y conos coluviales menores, localizados en los flancos de los valles intramontanos. Se constituyen de arcillas grises de inundación, localmente con intercalaciones de arenas muy finas a limosas de colores claros, dispuestos en capas delgadas horizontales de la llamada formación Chía. Asociadas con las llanuras de inundación de los ríos en la sabana de Bogotá se encuentran: Cuencas de decantación o basines (Fcd), Diques naturales o albardones (Fa), Deltas de desborde lateral (Fdd), Meandros abandonados (fmc), Barras puntuales (Fbp), Abanicos aluviales (Fa), Cono de deyección (Fcdy), Planos y planicies aluviales intramontanos (Fpp), Planos y artesas lagunares (Fpl), Planos anegadizos (Fpa)</p>



Figura 4.10 A la derecha mapa de UGS (adaptado de POMCA ,2018) y a la izquierda Mapa de Unidades y Subunidades geomorfológicas (tomado de SGC, 2005)

#### 4.2.1.2 Departamento del Quindío

- **Unidades Geológicas Superficiales**

Las unidades geológicas superficiales o materiales geológicos que se presentan en superficie son tomadas del documento “Geología para Ingeniería para el departamento del Quindío”, desarrollada dentro del “Proyecto Compilación de la Información Geomecánica, elaborado por (INGEOMINAS, 2005). Con base en este documento se presenta una descripción de los materiales geológicos de superficie presentes, clasificando los materiales en suelos y rocas respecto de sus propiedades geológicas y algunas propiedades geotécnicas básicas que le imprimen un comportamiento geomecánico a dichos materiales. Se efectúa un análisis particular sobre los materiales no consolidados tipo suelo, tal como se describió previamente para el caso de la Sabana de Bogotá. Las unidades de suelos que afloran el departamento del Quindío, de acuerdo con su origen, textura y granulometría se clasifican en dos (2) grupos: residuales (Srs), transportados (st). Igualmente, cada uno de los grupos se subdividen en subgrupos, en la Tabla 4.10 se presenta un resumen consolidado de las Unidades Geológicas de Superficie de interés para esta investigación que se encuentran en el departamento del Quindío, es decir los materiales ya sea residuales o

transportados que se pueden asociar a un origen volcánico con las características morfológicas que se plantean para esta investigación.

*Tabla 4.10*

*Unidades Geológicas Superficiales – UGS de interés geológico para esta investigación en departamento del Quindío (fuente propia)*

<b>Suelos residuales - Srs</b>	
<p><b>Los suelos residuales, son materiales producto de la meteorización y descomposición de las rocas in situ. De acuerdo con su composición litológica, textura y granulometría se clasifican en cuatro subgrupos: predominantemente arenosos, (Tipo 1); arcillo – limosos (Tipo 2), arcillo – arenosos (Tipo 3), y arcillo - arenosos con bloques (Tipo 4).</b></p>	
Suelos Residuales Tipo 1 (Srs 1).	
<p>Corresponden a los materiales producto de meteorización de areniscas, arcillolitas y conglomerados, pertenecientes a las Formaciones Cinta de Piedra y La Pobreza, y clasificadas dentro de este estudio como rocas blandas (Rb)). Se localizan en la parte occidental del área de estudio y específicamente en la orilla derecha del Río La Vieja. Son de color amarillo pálido y amarillo-naranja: granulométricamente se pueden clasificar como arenas y arcillas; son en general de consistencia blanda, poco densos, con estructuras heredadas, y húmedos. Su espesor oscila entre 2 y 4 m. aproximadamente.</p>	
<b>Suelos transportados (St)</b>	
Flujos volcánicos antiguos y suelo residual (Stfv+Srv).	Depósitos de piroclastos de caída (ceniza volcánica), de granulometría fina a media (Stv1).
<p>Estos tipos de materiales corresponden a los niveles que infra yacen a los depósitos piroclásticos de caída, de granulometría fina a media, pertenecientes a la unidad geológica Glacis o Abanico del Quindío. De acuerdo con INGEOMINAS (1999), a esta unidad se le asigna una edad Terciario Superior Plioceno y presenta un espesor variable entre 80 y 150 m. De acuerdo con las características de los perfiles estratigráficos de dicha unidad y analizados en diferentes sitios de la región, ésta se puede dividir en tres niveles.</p>	<p>Estos depósitos, son el producto de las erupciones volcánicas explosivas de los volcanes cercanos al área de estudio, y ocurridas entre el Pleistoceno y el Presente. Forman un manto de ceniza volcánica de espesor variable, los cuales siguen la morfología del terreno y cubren en su mayor parte las formaciones rocosas antiguas, en casi todo el departamento del Quindío. Desde el punto de vista granulométrico, los materiales varían desde arenas de grano medio a fino, limosas, hasta limos-areno-arcillosos, de composición heterogénea.</p>

- **Aspectos Geomorfológicos**

El departamento del Quindío se encuentra ubicada geomorfológicamente en la geomorfoestructura correspondiente al Sistema montañoso orogénico Andino que bordea el cratón Guayanés por su parte noroccidental. El departamento del Quindío está enmarcado por una serie de serranías morfoestructurales y volcánicas, que hacen parte de las vertientes oeste la cordillera



central, afectadas localmente por procesos fluvio volcánicos que han determinado la formación del abanico del Quindío. Se presentan Unidades y Subunidades de los ambientes morfogenéticos, morfoestructura denudativo, volcánico, denudacional, fluvial, glaciar – periglacial y antropogénico, unidades definidas con criterio genético, morfológico y geométrico en función de los procesos geomorfológicos específicos que las conforman; las subunidades están definidas fundamentalmente por los contrastes morfométricos que relacionan el tipo de sedimento o de roca y su disposición estructural, tanto con la correspondiente topografía del terreno como con los procesos dinámicos activos prevaecientes (INGEOMINAS, 2005). En la Tabla 4.11 se presentan las unidades y subunidades geomorfológicas de interés para esta investigación asociadas a un origen volcánico presentes en el departamento y en el anexo 5.2 se presenta en detalle el análisis de la información geomorfológica que permitió obtener las unidades de interés para esta investigación. Igualmente, en la Figura 4.11 se presentan el mapa de UGS y el mapa geomorfológico del departamento de Quindío.

*Tabla 4.11*

*Consolidado Unidades y subunidades geomorfológicas presentes en el departamento del Quindío (adaptado SGC, 2005)*

<b>3. Geoformas de origen volcánico</b>
Están formadas tanto por la acumulación de lava solidificada como de fragmentos lanzados al aire durante la erupción (productos piroclásticos – bloques, lapilli y ceniza volcánica) o como flujos de piroclastos que se desplazaron por las laderas de la cordillera. Igualmente se incluyen los flujos de escombros y lodos de origen fluvio volcánico y que se generaron en el plioceno – Pleistoceno por el deshielo de casquetes de hielo formados durante las glaciaciones.
<b>FLUJOS DE LAHAR (Vfl 1 - Vfl 2 - Vfl 3 - Vfl 4 - Vfl 5 - Vfl 6 - Vfl 7 - Vfl 8 - Vfl 9 - Vfl 10 - Vfl 11 - Vfl 12):</b> Flujos de avalanchas y escombros de formas lobuladas y aterrazadas de gran extensión cubiertas por un manto de piroclastos de caída de 3 - 25 m. Desarrollan un drenaje dendrítico asociado con escarpes y hondonadas en forma de artesa. Se constituyen de bloques de 10 - 30 cm con bloques diseminados mayores en matriz arenosa localmente tobácea de origen volcánico, localmente se presentan cubiertos de flujos de escombros.

Hacia la parte occidental del departamento del Quindío, zona de interés para esta investigación, las geoformas son de morfología alomada constituida por rocas sedimentarias Terciarias de origen fluvial y lagunar (Formaciones La Paila y Zarzal respectivamente) de acuerdo con Suter (2003). Según este autor hacia la base de la formación La Paila en esta región se presentan lavas riolíticas y no dacíticas como lo referencian González Iregui & Núñez Tello (1991) del mismo modo determina la presencia de rocas arcillosas pertenecientes a la formación Zarzal como terrazas

de erosión, lo cual define una cuenca del Quindío más amplia, cuya apertura y subsidencia se inicia desde el Plioceno, mucho antes de lo establecido previamente por otros autores. Cubriendo casi en su totalidad estas rocas a la altura del río La Vieja se encuentra el llamado abanico del Quindío constituido de flujos laháricos del Plioceno - Pleistoceno, y sedimentos principalmente de origen fluvial del Cuaternario más reciente.

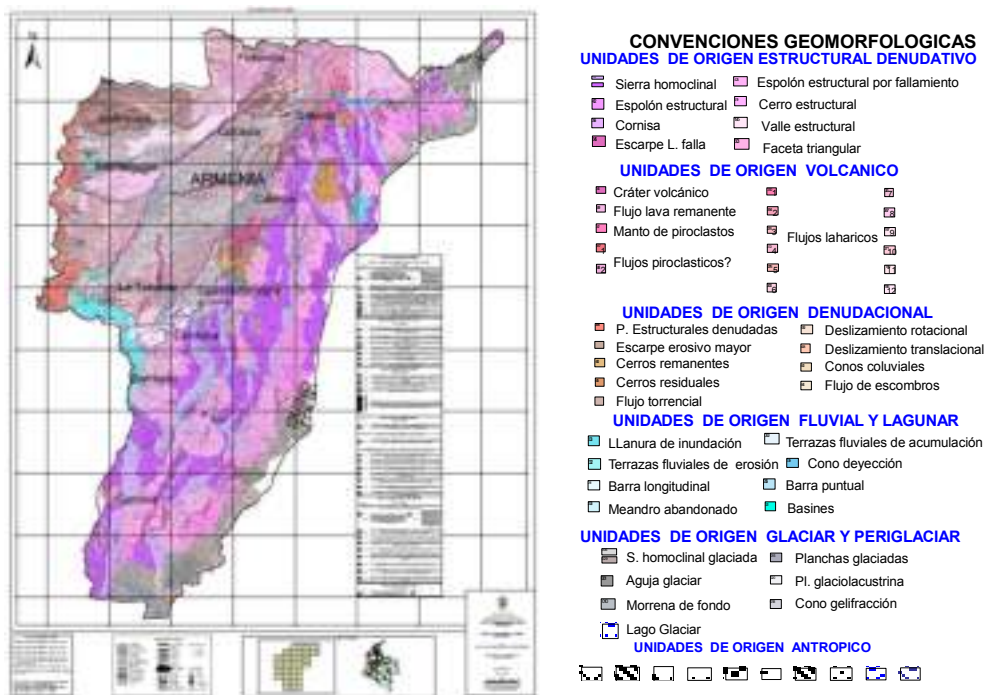


Figura 4.11 Mapa Geomorfológico del departamento del Quindío. (fuente INGEOMINAS, 2005)

#### 4.2.1.3 Municipio de Barranquilla

- **Unidades Geológicas Superficiales**

Las unidades geológicas superficiales o materiales geológicos que se presentan en superficie, independientemente de su edad, que se describen a continuación para la zona de laderas occidentales del municipio de Barranquilla, son tomadas del documento “ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DE LAS LADERAS OCCIDENTALES DE BARRANQUILLA, DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO” (INGEOMINAS, 2011); en este documento se aclara que las

Unidades Geológicas Superficiales cartografiadas se basaron en la clasificación realizada en la Evaluación Geotécnica de las Laderas Occidentales de Barranquilla-Fase I (INGEOMINAS, 1997a). En la zona de interés se presentan depósitos transportados sobre materiales rocosos de la formación Perdices; en la Tabla 4.12 se presenta una breve descripción de estos y en la Figura 4.12 se presenta el mapa de UGS en el sector de Loma Roja.

Con base en este documento se presenta una descripción de los materiales geológicos de superficie presentes en la zona de interés para este trabajo de investigación, se presentan básicamente los materiales superficiales asociados a materiales transportados y residuales de rocas de la Formación Perdices de origen marino.

*Tabla 4.12*  
*Unidades Geológicas Superficiales sector Loma Roja en el municipio de Barranquilla*  
*(Tomado de INGEOMINAS, 2011)*

<b>Suelos transportados (St)</b>	
<b>Son los materiales resultantes de la acción dinámica de los procesos geomorfológicos y de los agentes naturales como la gravedad, los sismos, los medios de transporte como el agua, el hielo, y depositados o llevados a los sitios que ocupan actualmente.</b>	
Depósitos de Talús (Stta)	Movimientos en masa (Stmm)
Son depósitos clasto-soportados que se forman en los cambios de pendiente fuerte por acumulación de fragmentos de roca que caen de la parte alta. Su composición depende del material a partir del cual se genera. En la zona de estudio se caracterizan por presentar cantos y bloques hasta de 3 metros de calizas arrecifales y areniscas calcáreas de grano grueso conglomeráticas compuestas por cuarzo, feldespatos y líticos, Estos cantos y bloques están embebidos en una matriz areno arcillosa, de color gris oscura, de aspecto terroso; en general son depósitos clasto soportados	Son depósitos incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos, de suelos y/o fragmentos de roca angulares a subangulares, depositados por la gravedad, reptación o movimientos en masa. Se caracterizan por ser materiales clasto-soportados o matriz-soportados según su origen, presentando fragmentos de calizas arrecifales, areniscas cuarzosas y arcillolitas, de tamaños variables entre pocos centímetros y varios metros, embebidos en una matriz arcilloarenosa variando a arenoarcillosa. Descripciones detalladas de estos materiales se hacen en el capítulo de Geotecnia.
<b>Suelos Residuales</b>	
son zonas con moderado grado de meteorización y fracturamiento, por lo general con pendientes menores a 15°, conformando por lo general laderas y colinas de morfologías cóncavas. Los materiales presentes están conformados predominantemente por arcillolitas limosas laminadas de la Formación Las Perdices, las cuales desarrollan suelos residuales arcillosos de poco espesor, altamente plásticos y con alto potencial de expansividad (Barro Gallego), en menor proporción se encuentran afloramientos de arcillolitas calcáreas (margas) y calizas arrecifales de la Formación La Popa, así como arenas gravosas deleznable de la Formación Las Perdices, en buena parte cubierta por construcciones urbanas, especialmente residenciales antiguas, y por vegetación principalmente de arbustales y herbazales, en menor proporción se observan sectores con deterioro de los suelos y de los recursos naturales.	

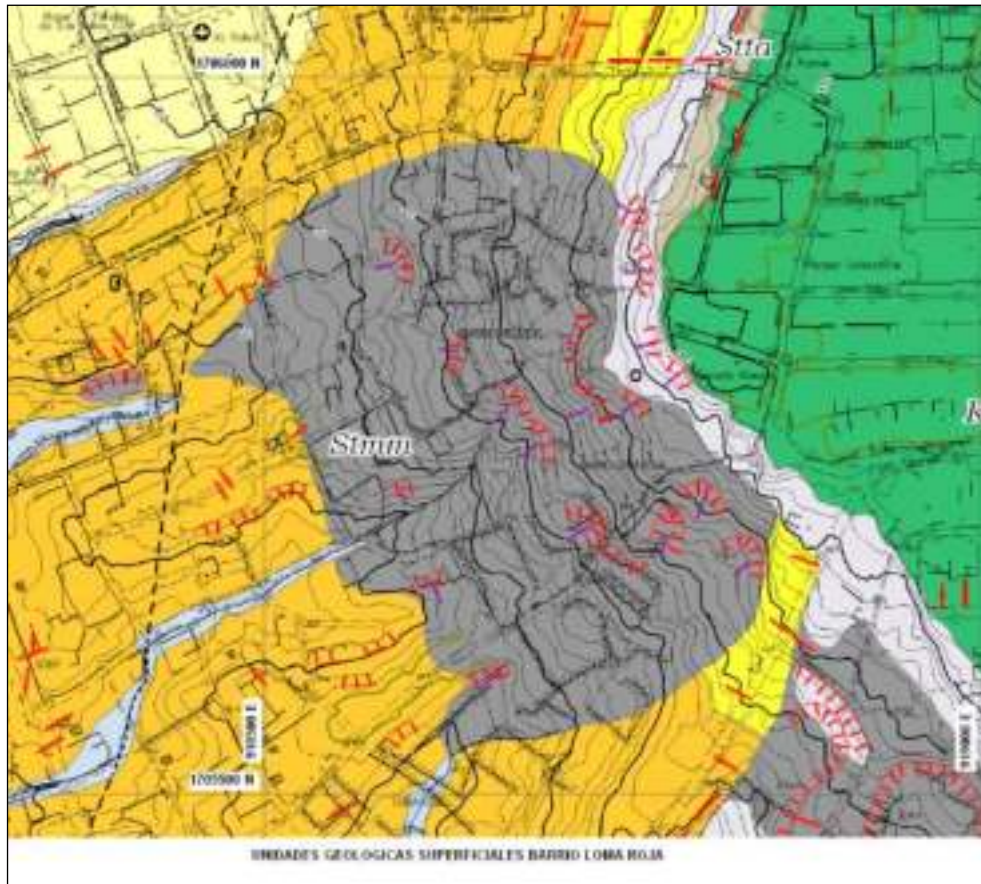


Figura 4.12 Unidades Geológicas Superficiales sector Loma Roja en el municipio de Barranquilla (Tomado de INGEOMINAS, 2011)

- **Aspectos Geomorfológicos**

En la ciudad de Barranquilla se desarrollan geoformas de ambientes de origen estructural, denudacional, kárstico, fluvial, marino-costero, eólico y antrópico. Las definiciones de las unidades y subunidades geomorfológicas se tomaron del ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL SECTOR COMPRENDIDO ENTRE BOCATOCINO, ATLANTICO Y CIENAGA, MAGDALENA, realizado por INGEOMINAS (2010). El origen de las geoformas está asociado a ambientes morfogenéticos (Ambientes Estructural, Denudacional, Fluvial, Glacial, Eólico, Kárstico, Marino-Costero y Antropogénico) que desarrollan los diferentes tipos de relieves y paisajes (continentales, marinos y costeros).

En la Tabla 4.13 se presentan las unidades y subunidades geomorfológicas de interés para la zona de estudio. Las principales geoformas que se observan en la zona de estudio son de origen denudacional y antrópico, sin embargo, están asociadas a materiales geológicos de origen marino y costero.

*Tabla 4.13*

*Consolidado Unidades y subunidades geomorfológicas de interés en el municipio de Barranquilla (adaptado SGC, 2010).*

<b>1. Geoformas de Origen Marino y Costero</b>	
<b>Estas geomorfos se originan debido a la erosión asociada a procesos gravitacionales y meteóricos, como de escorrentía superficial</b>	
<p>• <b>Llanuras intermareales y marismas (Mllin):</b> Son franjas lodosas de morfología plana suavemente inclinada hacia los cuerpos de agua y localizadas en las partes protegidas de las lagunas costeras, espigas y barras barreras. Su origen obedece a los cambios de marea en zonas protegidas, que permite la floculación de las arcillas y la posterior colonización de plantas y animales tolerantes a las aguas salobres.</p>	<p>• <b>Llanuras costeras (Mllc):</b> Extensas planicies ligeramente onduladas, limitadas hacia el continente por colinas o por zonas montañosas, y hacia el mar por playas o llanuras intermareales asociadas a lagunas costeras. Su génesis está ligado a procesos fluviomarinos de sedimentación y erosión en el pasado reciente y subreciente, cuando el mar estaba por encima del nivel actual.</p>
<b>2. Geoformas de Origen Denudacional</b>	
<b>Se originan debido a la erosión asociada a procesos gravitacionales y meteóricos, como de escorrentía superficial</b>	
<p>Colinas denudacionales (Dcd), • Cerros remanentes o relictos (Dcrm), Lomas estructurales por denudación (Dles), Conos de talus (Dct)</p>	

#### **4.3 CONSIDERACIONES GENERALES**

La respuesta de los suelos finos predominantemente arcillosos ante diferentes sollicitaciones producto de cambios ambientales o la acción del hombre, ha sido motivo de investigación y análisis desde diferentes enfoques que han permitido identificar variables de importancia, pero en la mayor parte de los casos estos estudios analizan por separado las temáticas cuyas variables determinan esta respuesta. Igualmente, los análisis geotécnicos enfocan sus esfuerzos principalmente en el comportamiento de los materiales en laboratorio (macroescala y microescala). En este sentido se presenta en este capítulo los aspectos temáticos de interés para la

identificación y caracterización de suelos finos predominantemente arcillosos desde la óptica de las escalas espacio – temporales de observación que determinan sus comportamiento y son claves para abordar el estudio de suelos finos predominantemente arcillosos (Torres, S. & Alarcón G., 2007), es decir : formación de rocas, ambientes de formación de rocas y suelos, etc., analizados a nivel de la megaestructura, pasando por los análisis de la macroestructura o sistema particulado que abordan los ensayos físico mecánicos de los estudios geotécnicos hasta el análisis de la microestructura o fábrica de los suelos.

Se aborda en este capítulo las bases conceptuales que soportan el estudio de los suelos finos predominantemente arcillosos desde la observación del comportamiento multiescala y multitemporal que involucra diferentes disciplinas del conocimiento, las cuales , en la generalidad de los estudios geotécnicos están presentes pero cuyo análisis se realiza en forma independiente, siendo todas estas variables dependientes espacial y temporalmente, es el caso de los estudios geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Es importante el hecho que, desde la visión de la macro escala en los estudios geotécnicos, los suelos definidos como arcillas se definen a partir de dos propiedades básicas: su tamaño y plasticidad; sin embargo, muchos suelos identificados como limos bajo estas condiciones pueden corresponder a arcillas con una microfábrica especial, tal como lo expresan diferentes autores, (Alonso et al., 1987; Collins & McGown, 1974; Grabowska-Olszewaska et al., 1984; Mitchell, 1993; Romero Morales, 1999). Este análisis es de especial importancia para suelos con génesis bien diferenciada, especialmente suelos volcánicos, para los cuales su respuesta geomecánica está soportada en una fábrica fuertemente afectada por los procesos de formación de rocas y suelos que los generan, estando la respuesta geomecánica de ellos gobernada más por la microfábrica, que determina la respuesta mecánica de la macroestructura.

Ramírez-Builes (2009) expresa claramente que los métodos de laboratorio geotécnico y edafológico que actualmente se emplean en Colombia para estimar propiedades como la capacidad de intercambio catiónico y clase textural por dispersión mecánica (hidrometría), generan resultados con altas incertidumbres, especialmente cuando se trata de materiales en donde predominan suelos de origen volcánico con alta presencia de minerales arcillosos tipo alófanos e imogolita (amorfos), las cuales presentan características especiales y muy diferentes a los minerales arcillosos cristalinos, estos minerales arcillosos encontrados en sus estudios presentan complejos órgano-metálicos muy fuertes.

Especialmente cuando se trata de analizar la respuesta esfuerzo – deformación de los suelos , se requiere no sólo una identificación precisa del accionar de los factores medioambientales, sino una gran capacidad de desarrollo de formas idóneas de escalarlas no solo en laboratorio (macroestructura) respecto de las escalas de geo-material que allí se manejan, sino desde un análisis de relaciones causales entre las variables genéticas (mega escala) de los materiales que se pueden conocer a partir de la geología, la geomorfología y la composición química y disposición microestructural (microestructura). En este sentido y dado que en la práctica general de la ingeniería no es generalizado el uso de ensayos especializados de resistencia y deformación como triaxiales y ensayos en oedómetro con deformación controlada, así como ensayos químicos, se presenta en este capítulo en forma resumida los estudios geotécnicos que se usaron para los análisis en esta investigación, así como los alcances prácticos de los resultados obtenidos de los mismos.

De vital importancia el desarrollo de análisis prospectivos del comportamiento de los suelos, para lo cual se presenta una visión generalizada de algunos modelos constitutivos usados para efectuar análisis prospectivos de comportamiento, enfocados a evaluar su aplicabilidad en materiales de génesis diferente, enfocándose en los modelos de uso más común y de fácil acceso en la práctica normal de la geotecnia, se eligieron para esta investigación el modelo convencional de uso generalizado en la práctica de la geotecnia Morh Coulomb basado en las teorías de plasticidad perfecta, el modelo Cam Clay que hace parte de los modelos elastoplásticos de estado crítico, estos primeros aplicados a suelos normalmente consolidados; el modelo Duncan Chang cuya aplicación para suelos sobreconsolidados lo hace de utilidad en la práctica de la ingeniera y una adaptación del modelo francés, que permite representación simplificada del comportamiento de suelos blandos con base en las propiedades índice de los materiales y por lo cual es de fácil y rápida aplicación.

Finalmente, y tratando de iniciar la aplicación de un análisis multiescala, con el fin de delimitar zonas homogéneas de menor tamaño que las identificadas a partir de las unidades litoestratigráficas presentadas en el capítulo 2, se presentan el resultado del análisis de la información que permite identificar zonas de comportamiento geológico – geomorfológico homogéneo a escala regional (escala 1:25.000) para uso en ingeniería, partiendo de las unidades litoestratigráficas de interés que se presentaron en el capítulo 2 y llegando a unidades geológicas

Superficiales (UGS) que cumplen con los criterios de elegibilidad previamente establecidos para su posterior análisis comparativo, así como subunidades geomorfológicas.

Para la Zona piloto 1 o Sabana de Bogotá, la UGS seleccionada corresponde a Suelos transportados (St) identificados como: Depósitos lacustres (Stl1) y Depósitos fluvio lacustres (Stfl), asociados a subunidades geomorfológicas de origen fluvial y lagunar identificadas como: Planicies y deltas lacustrinos (Fpla), Terrazas fluviales de acumulación (Ftar Ftas– Fta) y Planicie o llanuras de inundación (Fpi). Para la zona piloto 2, centro occidente del departamento del Quindío, las UGS seleccionadas corresponden a Suelos Residuales Tipo 1 (Srs 1) y Suelos transportados (St), estos últimos identificados como Flujos volcánicos antiguos y suelo residual (Stfv+Srv) y Depósitos de piroclastos de caída (ceniza volcánica), de granulometría fina a media (Stv1), todas ellas asociadas a las siguientes subunidades geomorfológicas: FLUJOS DE LAHAR (Vfl 1 - Vfl 2 - Vfl 3 - Vfl 4 - Vfl5 - Vfl 6 - Vfl 7 - Vfl 8 - Vfl 9 - Vfl 10 - Vfl 11 - Vfl 12. Finalmente, para la zona piloto 3, municipio de Barranquilla la UGS seleccionada corresponde a Suelos transportados (St), identificados como: Depósitos de Talús (Stta) y Movimientos en masa (Stmm), asociados a subunidades geomorfológicas de origen marino y costero identificadas como: Llanuras intermareales y marismas (Mllin, Llanuras costeras (Mllc).



# **CAPITULO 5**

## **RESULTADOS**

## 5 RESULTADOS

Tal como se describió en el capítulo 3 correspondiente a la metodología, la presentación de los resultados se muestra de acuerdo con los puntos identificados en la metodología planteada en la siguiente forma:

1. Modelo geológico – geomorfológico por zona piloto y mapas de ubicación de zonas de exploración geotécnica a escala 1:1000 para Sabana de Bogotá y Quindío. En Barranquilla no se desarrolló exploración geotécnica.
2. Base de datos geotécnica a partir de información secundaria.
3. Resultados de análisis estadístico de información geotécnica de base de datos por zona piloto para caracterización básica y geomecánica.
4. Resultados de exploración geotécnica por zona piloto y perfiles estratigráficos para Sabana de Bogotá y Quindío.
5. Construcción de modelos geológico- geotécnicos 2D y perfiles geológicos por zona piloto con el uso de los programas QGIS versión 3.4.8. y AutoCAD 2018, y perfil litológico tipo e identificación de variables geotécnicas tipo por zona piloto.
6. Resultados laboratorio físico – químico- geomecánico de muestras Sabana de Bogotá y Quindío.

En el capítulo 6 se presentará el análisis de los resultados y la discusión de estos en la siguiente forma:

1. Análisis estadístico de resultados de los ensayos de laboratorio de información primaria y secundaria existente por zona piloto para caracterización básica, resistencia y deformación.

2. Análisis prospectivo geomecánicos por zona piloto para los modelos constitutivos por zona piloto.
3. Análisis comparativo para las tres zonas piloto de aplicabilidad de modelos constitutivos respecto del origen de los suelos.

### **5.1 Modelo geológico – geomorfológico por zona piloto**

Tal como se describió en el capítulo 3, con base en la metodología descrita y el cruce de información cartográfica con el uso de QGIS respecto de los atributos descritos se efectuó la delimitación inicial del área de estudio para cada zona preseleccionada inicialmente: Sabana de Bogotá, Quindío y municipio de Barranquilla, bajando desde una escala 1:25.000 a 1:10.000 o escala municipal.

Como resultado del desarrollo de estos modelos geológico – geomorfológicos se definieron las zonas de estudio detalladas, obteniendo una localización que parte de áreas regionales en escala 1:25.000 a escala municipal o 1:10.000 y finalmente a polígonos detallados a escala 1:1000, que se presentan en resumen enseguida y de las cuales se detallan en los siguientes numerales los resultados analíticos obtenidos a partir de la información secundaria:

1. Sabana de Bogotá: municipios de Tabio y Tenjo (266 muestras con ensayos de laboratorio)
2. Departamento del Quindío: municipios de Tebaida, Armenia, Montenegro (1182 muestras con ensayos de laboratorio).
3. Municipio de Barranquilla: 207 muestras seleccionadas de 505 muestras existentes en la zona que cuentan con ensayos de laboratorio.

#### **5.1.1 Sabana de Bogotá**

En las tablas 5.1 a 5.3 se presentan los cruces de información geológico – geomorfológica y climática requeridos para el desarrollo del modelo geológico- geomorfológico y geotécnico que

permitió definir los polígonos de estudio a nivel municipal y posteriormente para determinación de los puntos de exploración geotécnica directa. Igualmente, en las Figuras 5.1 y 5.2 se presentan los resultados de cruce de información en QGIS, las zonas con mayor densidad de información geotécnica que cumplen con los criterios de selección se presentan en color rojo; para la zona de Sabana de Bogotá la mayor densidad se presenta al suroccidente del municipio de Tabio, en un área aproximada de 2 Has.

### **5.1.2 Departamento de Quindío**

En las tablas 5.4 a 5.6 se presentan los cruces de información geológico – geomorfológica y climática requeridos para el desarrollo del modelo geológico- geomorfológico y geotécnico que permitió definir los polígonos de estudio a nivel municipal y posteriormente para determinación de los puntos de exploración geotécnica directa. Igualmente, en las Figuras 5.3 y 5.4 se presentan los resultados de cruce de información en QGIS, las zonas con mayor densidad de información geotécnica que cumplen con los criterios de selección se presentan en color rojo; para el departamento de Quindío la mayor densidad se presenta al suroccidente en los municipios de Tebaida y Montenegro en un área de aproximadamente 2.5 Has. Las zonas con mayor densidad de información geotécnica que cumplen con los criterios de selección se presentan en color rojo. Es importante anotar que el municipio de Armenia, aunque cuenta con un número importante de puntos de exploración geotécnica presenta en superficie predominantemente materiales limosos hasta aproximadamente 15 metros de profundidad, por lo cual se seleccionó el municipio de Montenegro para el análisis final.

### **5.1.3 Municipio de Barranquilla**

En la tabla 5.7 se presenta el resultado de los cruces de información geológico – geomorfológica y climática requeridos para el desarrollo del modelo geológico- geomorfológico y geotécnico, la cual corrobora la ubicación del área de estudio a nivel local, sector de Loma Roja; dado que se cuenta con información geotécnica que incluye ensayos de laboratorio, además de tener estudios locales en el sector de Loma Roja, el cual cumple con los requerimientos definidos para el análisis que se propone en esta investigación.

Tabla 5.1

Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Sabana de Bogotá- parte 1- Geología

GEOLOGIA BÁSICA	ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	MATERIALES QUE LA CONSTITUYEN	ESPESOR APROX	EDAD	Unidad Geológica de Superficie ( UGS)	MATERIALES QUE LA CONSTITUYEN	ESPESOR APROX
<b>Formación Subchoque (Q1su)</b>	2700 y 2600 msnm	<b>arcillas arenosas, arcillas orgánicas y turbas–lignitos que se alternan con arenas arcillosas, gravas y gravillas</b>	aprox 150 a 200 mts	Pleistoceno temprano	<b>Suelo Transportado Fluvio Lacustres de la Formación Subchoque (Stflsu)1</b>	Secuencia interestratificada de arcillas, limos, arenas, gravas, y ocasionalmente capas lenticulares de turba y ceniza volcánica. Se presentan en general poco consolidados, densidad media, localmente con grietas y fisuras.	100 mts
<b>Formación Sabana ( Q1sa)</b>	2700 y 2600 msnm	<b>sedimentos lacustres, principalmente arcillosos con sectores puntuales de intercalaciones de arcilla orgánica, turba, arcillas arenosas, arenas arcillosas, gravas, gravillas y arenas</b>	aprox 300 mts	Pleistoceno Medio a Tardío.	<b>Suelo Transportado Fluvio Lacustres de la Formación Sabana (Stflsa)2</b>	Están constituidos principalmente por arcillas y limos; de color gris, amarillo pálido y naranja por meteorización, de consistencia blanda. Hacia los márgenes de la cuenca se presenta un incremento de intercalaciones lenticulares de arcillas orgánicas, turba, arcillas arenosas, arenas arcillosas	300 m(Van der Hammen, 1995)
<b>Formación Chía ( Q2ch)</b>	2700 a 2600 msnm	<b>arcillas grises claras, oscuras y amarillas</b>		Pleistoceno Tardío a Holoceno	<b>Suelo Transportado Aluvial de la Formación Chía (Stfch)3</b>	materiales de granulometría fina a media gruesa: arcillas, limos, arenas finas, gravas, gravillas y ocasionalmente bloques redondeados; los materiales de granulometría media y gruesa, se presentan hacia el techo de la secuencia	5 mts ((Van der Hammen y González (1963, 1965)

Tabla 5.2

Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Sabana de Bogotá- parte 1- Geomorfología- información edáfica

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	INCLINACIÓN DEL TERRENO	ESPESOR APROX	DESCRIPCIÓN	MATERIALES QUE LA CONSTITUYEN	MATERIALES GEOTÉCNICOS DE SUPERFICIE (HASTA 2.0 MTS)	DESCRIPCIÓN	Municipios cubiertos en área (m2)
<b>ORIGEN FLUVIAL Y LAGUNAR</b>	<b>Planicies y deltas lacustrinos (Fpla)</b>	3º - 5º	20 - 300 m.	Morfología plana y de aspecto aterrazado	Arcillas grises con delgadas intercalaciones de arcillas turbosas. Las arcillas son de características plásticas y localmente expansivas lo cual se evidencia en la deformación de las vías	CH, CL, CL-ML	Arcillas inorgánicas de plasticidad entre baja, media y alta; arcillas limosas de plasticidad baja a media	Tenjo (45.005 m2) Tabio (20.566 m2)

*Tabla 5.3*

*Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Sabana de Bogotá- parte 1- clima- nivel freático*

Municipios seleccionados	precipitación media anual (mm) área seleccionada	Evapotranspiración área seleccionada (mm)	Nivel freático prom área seleccionada cota de Fondo
	No aplica	No aplica	No aplica
Tenjo Tabio	Tenjo 401-800 Tabio 801-1700	900-1000	Tenjo 2490-2540 Tabio 2490-2540
	No aplica	No aplica	No aplica

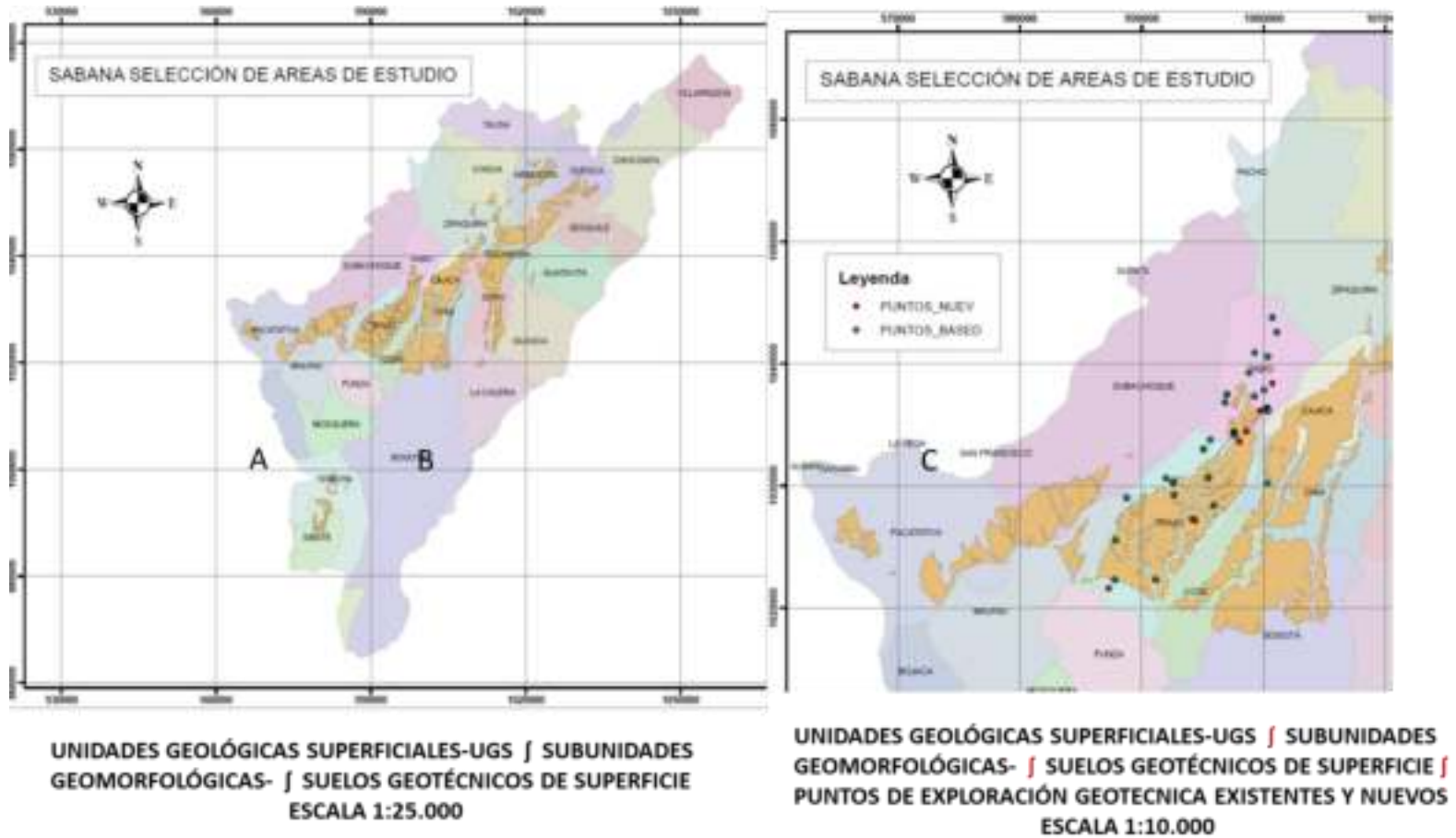
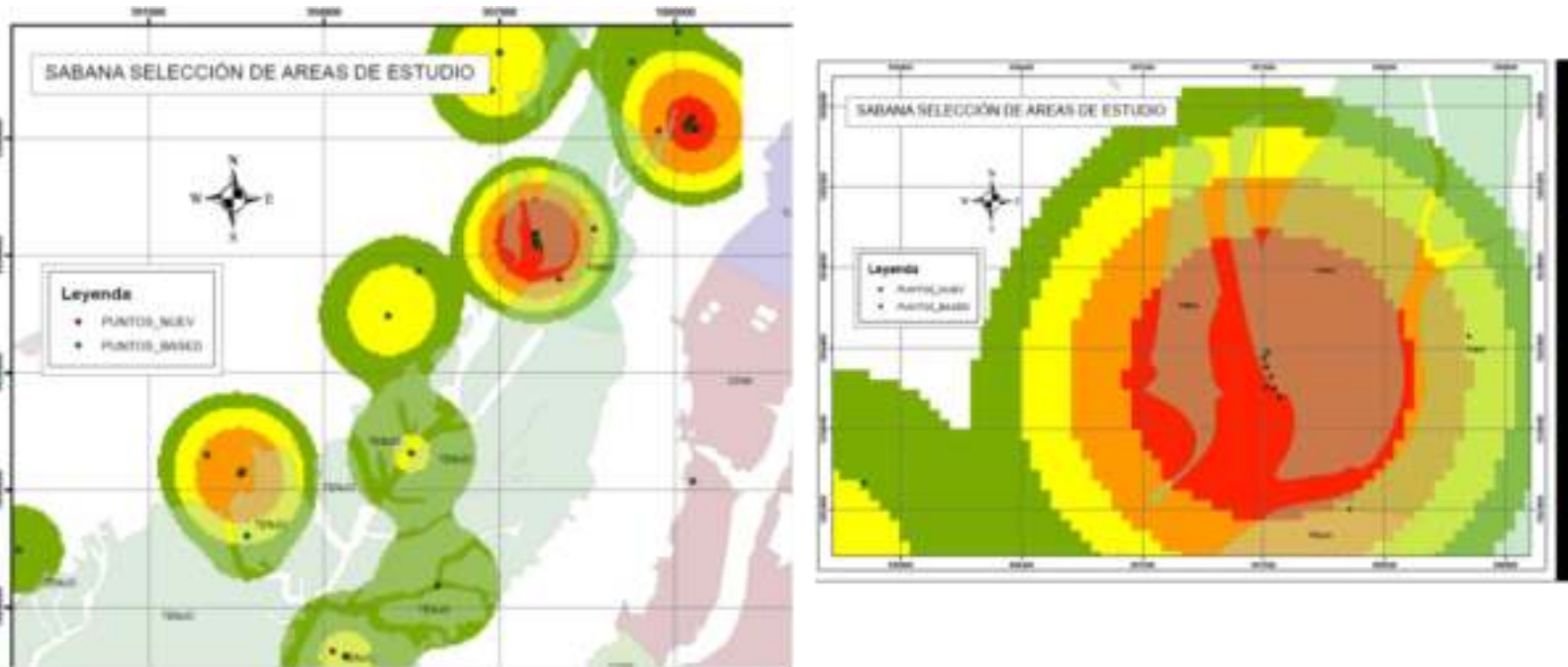


Figura 5.1 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Sabana de Bogotá: UGS- Subunidades geomorfológicas- Información geotécnica (fuente propia)





DENSIDAD DE INFORMACIÓN GEOTÉCNICA PARA IDENTIFICACIÓN DE POLÍGONOS DE ESTUDIO A ESCALA 1:1000.

Figura 5.2 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Sabana de Bogotá – mapa zonas polígonos de exploración (fuente propia)

Tabla 5.4

Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Quindío- parte 1- Geología

GEOLOGIA BÁSICA	MATERIALES QUE LA CONSTITUYEN	ESPESOR APROX	EDAD	Unidad Geológica de Superficie ( UGS)	MATERIALES QUE LA CONSTITUYEN	ESPESOR APROX
<b>GLACIS DEL QUINDIO O ABANICO DEL QUINDIO (TQgq)</b>	<p>Alternancias de flujos piroclásticos y laháricos y en menor proporción por Materiales fluviotorrenciales, glaciales y aluviales, en su gran mayoría cubierto Por tobas volcánicas (cenizas, lapilli y polvo volcánico) con colinas suaves y Redondeadas.</p>	aprox 100 o más	PLEISTOCENO - HOLOCENO	<b>Piroclastos de caída (Stv1)</b>	<p>Producto de las erupciones volcánicas explosivas de los volcanes cercanos . Depósitos de ceniza volcánica, que forman un manto de espesor variable en casi toda el área del departamento. Estas cenizas provienen de los volcanes del complejo Ruiz-Tolima y cubren parcialmente los flujos de lodo volcánico, los depósitos glaciares y los sedimentos aluviales del Abanico del Quindío</p>	entre 3 y 20 metros
			TERCIARIO SUPERIOR PLIOCENO	<b>Flujos Volcánicos y suelo residual (Stfv+Srv)</b>	<p>Depósitos de granulometría fina a gruesa, de composición heterogénea y formas variadas, dentro de una matriz de arena, limo y arcilla, horizontes superiores muy meteorizados originando suelo residual. El superior y ubicado inmediatamente debajo de los depósitos de ceniza volcánica (piroclastos de caída), conforma el horizonte de suelos residuales propiamente dichos, producto de la meteorización de los flujos volcánicos antiguos. Constituidos por limos y arcillas limosas, con esporádicos clastos rocosos de diferente composición, de colores amarillo, naranja y rojizo; como características principales se tienen: consistencia variable de blanda a compacta, de alta a baja plasticidad, y en general húmedos</p>	entre 80 y 150 mts los tres niveles y entre 3 y 15 metros el nivel superior

Tabla 5.5

Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Quindío- parte 2- Geomorfología- información edáfica

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	INCLINACIÓN DEL TERRENO	ESPESOR APROX	DESCRIPCIÓN	MATERIALES QUE LA CONSTITUYEN	MATERIALES GEOTÉCNICOS DE SUPERFICIE (HASTA 2.0 MTS)	DESCRIPCIÓN
ORIGEN VOLCÁNICO	FLUJOS DE LAHAR (Vfl 1 - Vfl 2 - Vfl 3 - Vfl 4 - Vfl 5 - Vfl 6 - Vfl 7 - Vfl 8 - Vfl 9 - Vfl 10 - Vfl 11 - Vfl 12)	5º - 10º	3-15 MTS	Flujos de avalanchas y escombros de formas lobuladas y aterrazadas de gran extensión cubiertas por un manto de piroclastos de caída originados por el deshielo de glaciares, ocasionado por la actividad de los volcanes del Quindío, Santa Isabel y cerro Santa Rosa	Los flujos laharicos en el departamento el Quindío presentan variación textural en los materiales desde las zonas proximales a las distales tanto vertical como longitudinalmente. Igualmente los flujos laharicos se encuentran afectados con diferentes grado de meteorización, dejando suelos residuales arcillosos de coloraciones rojizas	CH, CL, CL-ML	Arcillas inorgánicas de plasticidad entre baja, media y alta; arcillas limosas de plasticidad baja a media

*Tabla 5.6*  
*Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Quindío-*  
*parte 3- clima*

Municipios cubiertos en área (Ha) Hectareas	Exploración directa existente por municipio	Municipios seleccionados	Precipitación media anual (mm) área seleccionada	Evapotranspiración área seleccionada (mm)
Armenia 12120 Montenegro149 32 La Tebaida 9094	Armenia 16 Finlandia 11 Quimbaya 16 Montenegro 15 La tebaida 17 Circacia 10	Armenia Finlandia Quimbaya Montenegro o La tebaida Circacia	1701-3000	1200-1400

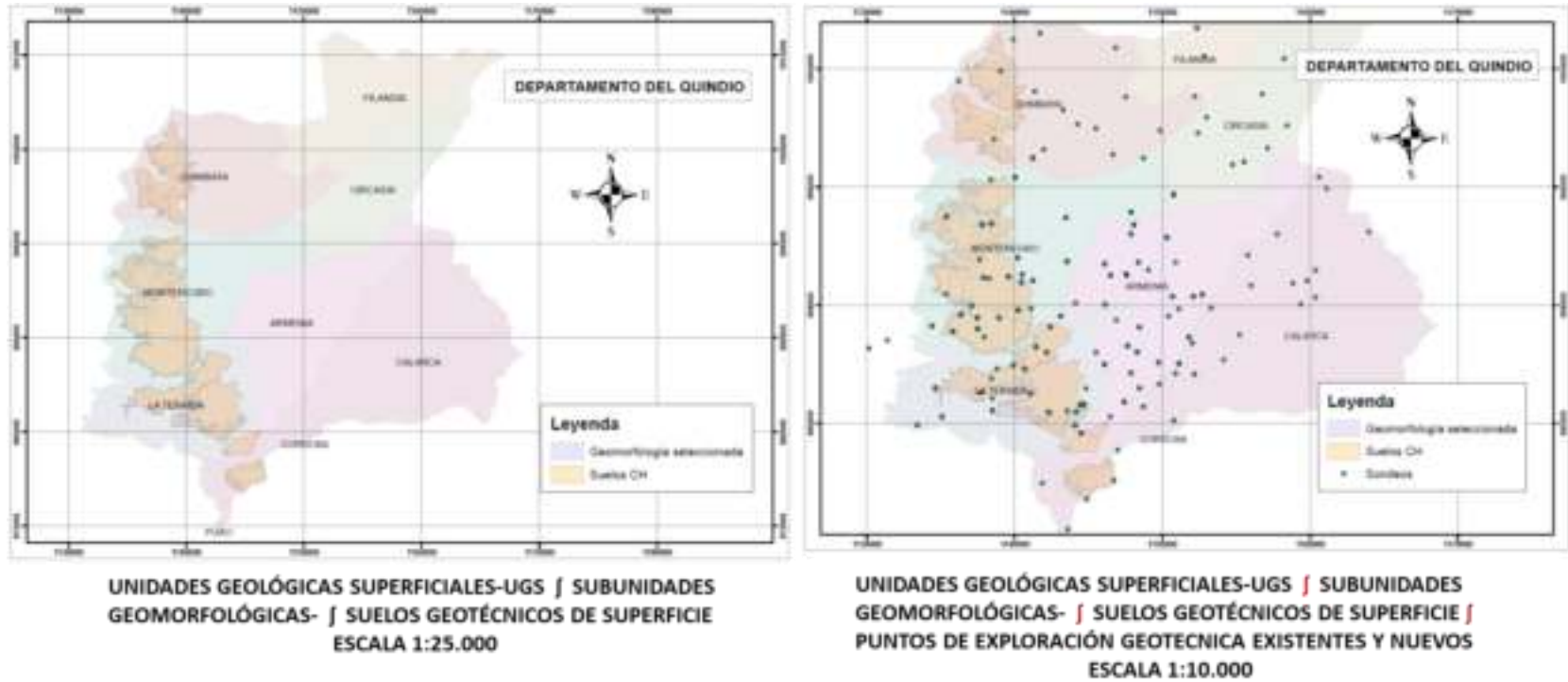
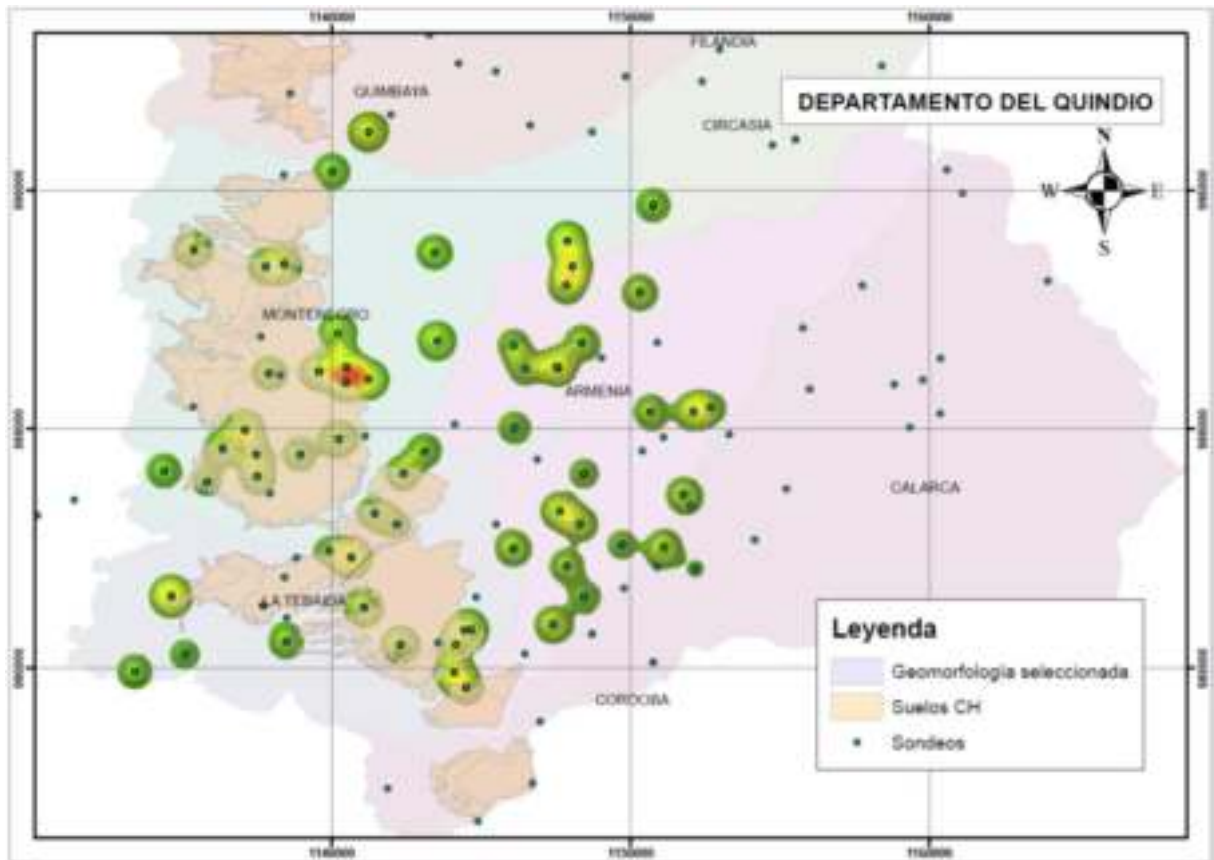


Figura 5.3 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Quindío: UGS- Subunidades geomorfológicas- Información geotécnica (fuente propia)



**DENSIDAD DE INFORMACIÓN GEOTÉCNICA PARA IDENTIFICACIÓN DE POLÍGONOS DE ESTUDIO A ESCALA 1:1000.**

*Figura 5.4 Mapas modelo geológico – geomorfológico parte 1- Quindío – mapa zonas polígonos de exploración (fuente propia)*

Tabla 5.7

Resultados de modelo geológico – geomorfológico e información edáfica para Municipio de Barranquilla

GEOLÓGICA BÁSICA	ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	MATERIALES QUE LA CONSTITUYEN	ESPESOR APROX	EDAD	Unidad Geológica de Superficie (UGS)	MATERIAS QUE LA CONSTITUYEN	ESPESOR APROX	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	INCLINACIÓN DEL TERRENO	ESPESOR APROX	DESCRIPCIÓN	MATERIALES QUE SE ENCONTRAN EN SUPERFICIE (UNIDAD LITOLÓGICA)	DESCRIPCIÓN	ZONA DE ESTUDIO
<b>FORMACIÓN PERDICES (Pg/No)</b>	100 MSNM	Rocas detríticas fino granulares (lodolitas) rocas lodosas	aprox 100 o más	Oligoceno Superior	Suelos residuales de la Formación Perdices	Suelos residuales principalmente de tipo arcillo, son notables por su carácter plástico y expansivo, presentan altos contenidos del mineral illita y estructura floculada producto del ambiente de depositación marino.	entre 1 y 30 metros	<b>ORIGEN MARINO Y COSTERO</b>	Llanuras costeras (Mlc)	5° - 30°	3-30 MTS	Extensas planicies ligeramente onduladas. Su génesis está ligado a procesos fluviomarinos de sedimentación y erosión en el pasado reciente y subreciente, cuando el mar estaba por encima del nivel actual.	Ch, Cl	Arcillas inorgánicas de plasticidad entre baja, media y alta	Barranquilla en el sector de Loma Roja

#### **5.1.4 Análisis integrado de los modelos geológico – geomorfológicos**

La propuesta de modelo geológico – geomorfológico partió de un análisis regional a escala 1:25.000 para las tres zonas piloto, y ella permitió a través de un análisis multiescala el uso de ARC GIS, delimitar las UGS de interés descritas en el capítulo 4 y las subunidades geomorfológicas, a partir de este modelo se pueden resumir las características por zona piloto en la siguiente forma:

##### **5.1.4.1 Zona Piloto 1 - Sabana de Bogotá (municipio de Tabio):**

se trata de suelos de origen lacustre, cuya UGS predominante corresponde a suelos transportados de la Formación Sabana (Stfla, Stfl), constituidos principalmente por arcillas de color gris y que pueden alcanzar hasta los 300 metros de profundidad (van der Hammen, 1998), asociados a geoformas del tipo planicies y deltas lacustrinos (Fpla) de morfología plana y aspecto aterrazado, localizados principalmente en áreas rurales del municipio de Tabio en el departamento de Cundinamarca con cobertura principal de pastos; en la zona predomina un clima frío seco a frío húmedo en algunos sectores (IGAC), con meteorización química moderada, altitud entre 2000 y 3000 msnm y temperaturas media entre 12 y 18 grados. El perfil promedio de los suelos estudiados está compuesto por alternancia de suelos arcillosos de plasticidad media, con suelos limo arenosos de baja plasticidad para profundidades entre 0 y 15 metros de profundidad media con dos niveles litológicos, el primero nivel A entre 0 y 5.0 metros en promedio y el segundo nivel litológico B entre 5 y 15 metros que se diferenciaron por el grado de consolidación de los materiales.

##### **5.1.4.2 Zona Piloto 2 - Quindío (Montenegro – Tebaida sur occidente Armenia):**

Se trata de suelos de origen volcánico, cuya UGS predominante corresponde a piroclastos de caída (Stv1) con espesor promedio entre 3 y 20 metros, flujos volcánicos y suelo residual (Stfv+Srv) que alcanzan entre 80 y 150 metros, del Glacis del Quindío o abanico del Quindío (TQgq), conformados por depósitos de ceniza volcánica y flujos volcánicos que subyacen los depósitos de ceniza de granulometría fina a gruesa y composición heterogénea. Los suelos residuales producto de flujos volcánicos antiguos están constituidos principalmente por limos y arcillas limosas con esporádicos clastos; como principal geomorfoforma asociada se tienen los flujos de lahar (Vfl..) de



formas aterrazadas y lobuladas de gran extensión localizados principalmente en áreas rurales de los municipios de Montenegro, Tebaida y la zona sur occidental de Armenia en el departamento del Quindío con cobertura principal de cultivos de plátano, café, cacao y algunas zonas de pastos; en la zona predomina un clima medio húmedo (IGAC), con meteorización mecánica y química moderada, altitud entre 1000 y 2000 msnm y temperaturas media entre 18 y 24 grados. El perfil promedio de los suelos estudiados está compuesto por alternancia de suelos arcillo limosos de plasticidad media a alta, para profundidades entre 0 y 15 metros de profundidad con dos niveles litológicos, el primero nivel A entre 0 y 5.0 metros en promedio y el segundo nivel litológico B entre 5 y 15 metros diferenciados por el grado de consolidación principalmente.

#### **5.1.4.3 Zona Piloto 3- Barranquilla- sector Loma Roja:**

Se trata de suelos de origen marino costero, sobre consolidados cuya UGS predominante corresponde a suelos residuales de la Formación Perdices (PgNgp) principalmente de tipo arcilloso asociados a llanuras costeras (Mllc) extensas planicies ligeramente onduladas cuya génesis está ligada a procesos fluvio marinos de sedimentación y erosión en el pasado reciente con espesor entre 3 a 30 metros distribuidos en zonas urbanas y suburbanas del municipio de Barranquilla, específicamente en el sector de Loma Roja, objeto de esta investigación. En la zona predomina un clima cálido seco (IGAC), altitud entre 0 y 1000 msnm y temperaturas media mayores a 24 grados. El perfil promedio de los suelos estudiados está compuesto por suelos arcillosos principalmente de plasticidad entre media a alta, para profundidades entre 0 y 15 metros de profundidad con dos niveles litológicos, el primero nivel A entre 0 y 5.0 metros en promedio y el segundo nivel litológico B entre 5 y 15 metros diferenciados por el grado de consolidación principalmente.

## **5.2 Base de datos geotécnico a partir de información secundaria**

Producto de la identificación de las zonas de estudio a partir del modelo geológico geomorfológico se construyó una base de datos con la información de resultados de ensayos geotécnicos en los municipios y localidades identificados, tal como se describió en el numeral 3.3. En la Tabla 5.8 se presenta un resumen consolidado de la información geotécnica almacenada en la

base de datos a nivel de municipalidad y en la Tabla 5.9 se puede observar los puntos de exploración y número de muestras por zona piloto, por municipio y localidad.

**Tabla 5.8**  
*Información de muestreo geotécnico para las tres zonas piloto almacenada en base de datos para análisis básico (adaptado SGC, 2010)*

Zona de estudio	Puntos de exploración	Muestras	Ensayos de caracterización	Ensayos de resistencia y deformación	Ensayos químicos	Ensayos Geotécnicos y geofísicos	Ensayos dinámicos	Municipios	Observaciones
Sabana de Bogotá	46	266	358	25	0	36	0	Tabio, Tenjo	Datos provenientes principalmente del estudio del INGEOMINAS, 2005
Quindío	108	911	2187	71	22	110	98	Armenia, Montenegro, Tebaida	Los datos se refieren principalmente a la ciudad de Armenia, producto de los estudios de "Microzonación sísmogeotécnica indicativa de Armenia", INGEOMINAS, 1999
Barranquilla	17	207	350	20	10	10	10	Sector Carson, Mirador	principalmente del estudio del INGEOMINAS, 2011
<b>TOTAL</b>	<b>171</b>	<b>1384</b>	<b>2895</b>	<b>116</b>	<b>32</b>	<b>156</b>	<b>108</b>		

**Tabla 5.9**  
*Información de muestreo geotécnico para las tres zonas piloto almacenada en base de datos por municipio y localidad (adaptado SGC, 2010)*

Zona de estudio	Puntos exploración con coordenadas		
	Tabio	Tenjo	
Sabana de Bogotá	30	16	
	<b>Número de muestras</b>		
	156	110	
Quindío	<b>Montenegro</b>	<b>Tebaida</b>	<b>Armenia</b>
	42	21	45
	<b>Número de muestras</b>		
	358	171	382
Barranquilla	17		
	<b>Número de muestras</b>		
	207		

La base de datos consta de 47 atributos distribuidos en la siguiente forma: 14 variables referidas a la localización espacial y en profundidad; diecinueve (19) variables referidas a propiedades índice, granulometría, hidrometría y clasificación USC, tres (3) variables referidas a la permeabilidad, once (11) variables referidas a la consolidación unidimensional y ensayo de

expansión, cinco (5) variables referidas a la compresión simple, veintiséis (26) variables referidas a ensayos triaxiales y de corte directo.

Es importante anotar, que del total de ensayos ejecutados solo el 1.8% corresponde a análisis químicos, es decir prácticamente no se han desarrollado análisis para el estudio de la microfábrica de los materiales en las zonas de estudio; igualmente de estos ensayos solo el 4% corresponde a análisis de resistencia y deformación, estando concentrada la información en los ensayos de caracterización básica. Estos ensayos de caracterización básica permiten identificar en profundidad la existencia de materiales que se puedan clasificar como arcillas, arcillas limosas o limos arcillosos de acuerdo con la clasificación USC, sin embargo, para los fines de esta investigación no aporta más información de importancia respecto del comportamiento geomecánico de los materiales.

En el anexo 5.1 se presentan los puntos de exploración que se encuentran en las zonas de estudio, varios puntos no presentan coordenadas, por lo tanto, no se usaron los resultados de estos. Con base en este análisis, se efectuó un filtro de información por coordenadas por zona tal como se presenta en la tabla 5.10 para sabana con el fin de evitar duplicidad de información.

En el Anexo 5.2 se presenta el compilado de datos analizado por zona piloto y que posteriormente fue analizado en conjunto con los datos de información primaria. Para el caso de Sabana de Bogotá solo se analizaron los datos del municipio de Tabio, para el departamento del Quindío se analizaron los resultados de ensayos para los municipios de Tebaida, Montenegro y Armenia, aunque solo se habían preseleccionado para análisis los municipios de Tebaida y Montenegro, dado que en Armenia se encuentran unidades similares y se tiene mayor cantidad de información. Para Barranquilla se analizaron los 17 puntos.

Para cada zona piloto se seleccionaron los puntos de muestreo y las muestras que cumplen con los criterios de evaluación y que corresponden con el tipo de material en evaluación, en este caso materiales de clasificación geotécnica tipo CH, CL, es decir materiales predominantemente arcillosos; en esta fase del proyecto se dio prioridad a muestras predominantemente arcillosos, sin embargo se incluyeron materiales que en su clasificación pueden presentarse como limos arcillosos o arcillas limosas tipo (ML-CL o CL-ML) dado lo comentado respecto de la clasificación de los

materiales en el capítulo 4; igualmente se disminuyó el rango de pendiente entre cero y 5 grados. Los criterios de selección de la información secundaria por zona piloto se presentan en las tablas 5.11 a 5.13.

*Tabla 5.10  
Revisión de información y localización cartográfica de Sondeos para Quindío (fuente propia)*

PUNTOS DE EVALUACION SABANA						
SONDEO	MUNICIPIO	NORTE	ESTE	SUB UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	MATERIALES GEOTECNICOS	OBSERVACIONES
QUI-AR-SCRG-04-MS7-1	MONTENEGRO	993993,1391	1135388,979	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
M7 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	993985,8038	1135390,799	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM5-1	MONTENEGRO	993438,0565	1137801,145	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm5 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	993431,0566	1137803,544	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-M13-1	MONTENEGRO	993512,8502	1138414,619	Vfi10	CH	
QUI-AR-SCRG-04-MM10-1	MONTENEGRO	989920,0721	1139583,294	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm10 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	989913,2886	1139585,84	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM11-1	MONTENEGRO	990066,0636	1140498,865	Vfi10	CL-SC	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm11 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	990056,0685	1140501,051	Vfi10	CL-SC	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM9-1	MONTENEGRO	989559,0673	1140478,15	Vfi10	CL-SC	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm9 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	989551,087	1140480,157	Vfi10	CL-SC	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM7-1	MONTENEGRO	989661,7788	1141236,548	Vfi10	CL-SC	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm7 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	989655,2207	1141238,568	Vfi10	CL-SC	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM6-1	MONTENEGRO	987964,8123	1137095,078	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm6 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	987957,394	1137097,531	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM3-1	MONTENEGRO	987142,0225	1137466,505	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm3 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	987135,1261	1137468,85	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM1-1	MONTENEGRO	986407,7761	1137507,832	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm1 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	986400,4677	1137509,879	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MM4-1	MONTENEGRO	987132,2519	1138949,767	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
Mm4 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	987125,2705	1138952,553	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-MS10-1	MONTENEGRO	987656,7889	1140240,927	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
M10 (SONDEOS INGEOMINAS)	MONTENEGRO	987649,5023	1140243,102	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-T5-1	LA TEBAIDA	983913,9851	1139935,895	Vfi11	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
T5 (SONDEOS INGEOMINAS)	LA TEBAIDA	983907,0404	1139938,618	Vfi11	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-T5A-1	LA TEBAIDA	983694,0135	1140664,053	Vfi11	CH	
QUI-AR-SCRG-04-T7-1	LA TEBAIDA	982017,1822	1141098,672	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
T7 (SONDEOS INGEOMINAS)	LA TEBAIDA	982010,2341	1141107,16	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-T4-1	LA TEBAIDA	980768,7724	1142315,887	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
T4 (SONDEOS INGEOMINAS)	LA TEBAIDA	980762,4379	1142318,025	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO
QUI-AR-SCRG-04-A1-1-1	LA TEBAIDA	981245,6568	1144452,24	Vfi10	CH	
QUI-AR-SCRG-04-T9-1	LA TEBAIDA	981276,7825	1144680,398	Vfi10	CH	
QUI-AR-SCRG-04-A27-1	ARMENIA	979328,5001	1144508,024	Vfi10	CH	POR CONVERSION DE COORDENADAS
A27 (SONDEOS INGEOMINAS)	ARMENIA	979321,6528	1144510,499	Vfi10	CH	ES POSIBLE QUE SE TRATE DEL MISMO

Tabla 5.11

Criterios de comparabilidad para el desarrollo de análisis primarios para Sabana de Bogotá (fuente propia)

	Unidad Geológica de Superficie ( UGS)	pendiente	SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	MATERIALES GEOTÉCNICOS DE SUPERFICIE (HASTA 2.0 MTS)	INFORMACIÓN SECUNDARIA	INFORMACIÓN PRIMARIA
SABANA DE BOGOTÁ	Suelo Transportado Fluvio Lacustres de la Formación Subachoque (Stflsu)1	3º - 10º	Planicies y deltas lacustrinos (Fpla)	CH, CL	Perforaciones localizadas en la zona de cruce	Perforaciones localizadas en la zona de cruce
	Suelo Transportado Fluvio Lacustres de la Formación Sabana (Stflsa)2					
	Suelo Transportado Aluvial de la Formación Chia (Stfch)3					

Tabla 5.12

Criterios de comparabilidad para el desarrollo de análisis primarios para Quindío (fuente propia)

	Unidad Geológica de Superficie ( UGS)	pendiente	SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	MATERIALES GEOTÉCNICOS DE SUPERFICIE (HASTA 2.0 MTS)	INFORMACIÓN SECUNDARIA	INFORMACIÓN PRIMARIA
QUINDIO	Piroclastos de caída (Stv1)	3º - 10º	FLUJOS DE LAHAR (Vfl 1 - Vfl 2 - Vfl 3 - Vfl 4 - Vfl 5 - Vfl 6 - Vfl 7 - Vfl 8 - Vfl 9 - Vfl 10 - Vfl 11 - Vfl 12)	CH, CL	Perforaciones localizadas en la zona de cruce	Perforaciones localizadas en la zona de cruce
	Flujos Volcánicos y suelo residual (Stfv+Srv)					

Tabla 5.13  
 Criterios de comparabilidad para el desarrollo de análisis primarios para Barranquilla  
 (fuente propia)

	Unidad Geológica de Superficie (UGS)	pendiente	SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	MATERIALES GEOTÉCNICOS DE SUPERFICIE (HASTA 2.0 MTS)	INFORMACIÓN SECUNDARIA	INFORMACIÓN PRIMARIA
BARRANQUILLA	Piroclastos de caída (Stv1)	3ª - 10ª	FLUJOS DE LAHAR (Vf1 1 - Vf1 2 - Vf1 3 - Vf1 4 - Vf1 5 - Vf1 6 - Vf1 7 - Vf1 8 - Vf1 9 - Vf1 10 - Vf1 11 - Vf1 12)	CH, CL	Perforaciones localizadas en la zona de cruce	Perforaciones localizadas en la zona de cruce
	Flujos Volcánicos y suelo residual (Stfv+Srv)					

Del total de 171 puntos de exploración geotécnica encontrados y organizados en la base de datos y que fueron seleccionados después de la depurada la información resumidos en la tabla 5.9, tan solo 20 puntos cumplen con todos los criterios identificados en el modelo geológico – geomorfológico para análisis; sin embargo, otros puntos cercanos que no cumplen con alguno de los criterios geológico – geomorfológico cuentan con información geotécnica de interés con el fin de poder efectuar un análisis estadístico con menos incertidumbre. Con base en lo anterior y un análisis detallado de la información geotécnica existente se incluyeron nuevos puntos de información secundaria, los cuales se evaluaron en el análisis estadístico de información secundaria, para un total de 60 puntos de exploración de los 208, con los cuales se cuenta con información geotécnica correlacionable para los municipios identificados, que se resumen en la siguiente forma:

1. Sabana de Bogotá: 11 puntos de exploración en el municipio de Tabio.
2. Departamento de Quindío: 34 puntos de exploración, distribuidos en la siguiente forma: 9 en el municipio de Tebaida, 12 en el municipio de Montenegro y 13 en el municipio de Armenia.

3. Barranquilla: de los 15 puntos localizados en el sector, 8 puntos cumplen con los criterios y tienen coordenadas y 7 puntos no tienen coordenadas, aunque se ubican en el sector de influencia y tienen datos de resistencia y deformación, por lo cual se usaron para los análisis estadísticos.

En las tablas 5.14 a 5.18 se presentan las coordenadas de los puntos seleccionados para análisis de información secundaria para los municipios de Tabio en Sabana de Bogotá: 11 puntos (zona piloto 1); Montenegro, Tebaida y Armenia: 34 puntos (zona piloto 2) y Barranquilla: 15 puntos (zona piloto 3).

Tabla 5.14

Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Tabio (zona piloto 1). (fuente propia)

PUNTOS DE EVALUACION SABANA - BASE DE DATOS									
PUNTOS	SONDEO	MUNICIPIO	NORTE	ESTE	UNIDAD GEOLOGICA	PENDIENTE	SUB UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	MATERIALES GEOTECNICOS	OBSERVACIONES
1	CUN-TA-SC029-AP1-M1	Tabio	1034379	997620	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- SOLO TIENE INFORMACION BÁSICA
2	CUN-TA-SC029-PE1-M1	Tabio	1034350	997600	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- TIENE INFORMACIÓN DE INTERÉS DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN
3	CUN-TA-SC029-PE2-M1	Tabio	1034306	997614	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-SOLO TIENE INFORMACIÓN BÁSICA
4	CUN-TA-SC029-AP2-M1	Tabio	1034261	997637	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- SOLO TIENE INFORMACION BASICA
5	CUN-TA-SC002-S1-M4	Tabio	1036325	1000275	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN, TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
6	CUN-TA-SC002-S2-M1	Tabio	1036285	1000250	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN, TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
7	CUN-TA-SC002-S3-M2	Tabio	1036275	1000225	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN, TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
8	CUN-TA-SC002-S5-M1	Tabio	1036175	1000220	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN, TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
8	CUN-TA-SC002-S6-M1	Tabio	1036165	1000245	Stf12	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN, TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
9	CUN-TA-SC029-AP3-M1	Tabio	1034205	997610	Stf1	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN- SOLO TIENE INFORMACIÓN BÁSICA
10	CUN-TA-SC029-PE3-M1	Tabio	1034202	997652	Stf1	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN, TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
11	CUN-TA-SC029-PE4-M1	Tabio	1034156	997682	Stf1	0º - 10º	Fpla	ML-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO CUMPLE CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACIÓN, TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS



Tabla 5.15

Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Tebaida -Quindío (zona piloto 2). Parte 1

PUNTOS DE EVALUACION QUINDIO - BASE DE DATOS									
PUNTOS	SONDEO	MUNICIPIO	NORTE	ESTE	UNIDAD GEOLOGICA	PENDIENTE	SUB UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	MATERIALES GEOTECNICOS	OBSERVACIONES
1	QUI-TE-NA-T1-M1	LA TEBaida	980986	805462	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- CARECE DE INFORMACIÓN DE LABORATORIO DE INTERES
2	QUI-TE-NA-T15-M2	LA TEBaida	985269	808445	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- NO TIENE INFORMACIÓN DE LABORATORIO DE INTERÉS
3	QUI-TE-NA-T8-M3	LA TEBaida	982456	811820	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- NO TIENE INFORMACIÓN DE LABORATORIO DE INTERÉS
4	QUI-TE-NA-T2-M1	LA TEBaida	982526	801619	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
5	QUI-TE-NA-T3-M1	LA TEBaida	980015	800385	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
6	QUI-TE-NA-T5-M1	LA TEBaida	984022	806925	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
7	QUI-TE-NA-T6-M2	LA TEBaida	984897	812503	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- INFORMACIÓN BÁSICA DE INTERÉS
8	QUI-TE-NA-T7-M5	LA TEBaida	984897	812503	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- TIENE ALGUNA INFORMACIÓN DE INTERES EN DEFORMACIÓN
9	QUI-TE-NA-T9-M3	LA TEBaida	981365	811659	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfl	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- TIENE INFORMACIÓN DE INTERES EN DEFORMACIÓN

Tabla 5.16

Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Montenegro -Quindío (zona piloto 2). Parte 2

PUNTOS DE EVALUACION QUINDIO - BASE DE DATOS									
PUNTOS	SONDEO	MUNICIPIO	NORTE	ESTE	UNIDAD GEOLOGICA	PENDIENTE	SUB UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	MATERIALES GEOTECNICOS	OBSERVACIONES
1	QUI-MON-NA-MS1	MONTENEGRO	986526	804506	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
2	QUI-MON-NA-MS2	MONTENEGRO	986727	801398	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
3	QUI-MON-NA-MS3	MONTENEGRO	987261	804468	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
4	QUI-MON-NA-MS4	MONTENEGRO	4°30'57.8"	75°47'15.3"	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- INFORMACIÓN BÁSICA DE INTERÉS
5	QUI-MON-NA-MS6	MONTENEGRO	988085	804100	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
6	QUI-MON-NA-MS7	MONTENEGRO	989766	808249	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
7	QUI-MON-NA-MS8	MONTENEGRO	987460	803355	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- INFORMACIÓN BÁSICA DE INTERÉS
8	QUI-MON-NA-MS10	MONTENEGRO	990031	806597	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION- SOLO TIENE INFORMACIÓN BÁSICA
10	QUI-MON-NA-MS9	MONTENEGRO	989665	807490	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
11	QUI-MON-NA-MS12	MONTENEGRO	996741	807066	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
12	QUI-MON-NA-MS13	MONTENEGRO	996629	805443	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS

Tabla 5.17

Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Armenia -Quindío (zona piloto 2). Parte 3

PUNTOS DE EVALUACION QUINDIO - BASE DE DATOS									
PUNTOS	SONDEO	MUNICIPIO	NORTE	ESTE	UNIDAD GEOLOGICA	PENDIENTE	SUB UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	MATERIALES GEOTECNICOS	OBSERVACIONES
1	QUI-AR-NA-AP1	ARMENIA	992891	814894	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
2	QUI-AR-NA-AP3	ARMENIA	993514	815099	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
3	QUI-AR-NA-AP4	ARMENIA	988253	811131	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
4	QUI-AR-SC99-P1	ARMENIA	ANCIANATO C. DORADA-B.COOPERATIVO	ANCIANATO C. DORADA-B.COOPERATIVO	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
5	QUI-AR-SC99-P2	ARMENIA	CASD BARRIO LIMONAR	CASD BARRIO LIMONAR	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
6	QUI-AR-SC99-P3	ARMENIA	GALERIA	GALERIA	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
7	QUI-AR-SC99-P4	ARMENIA	TELEARMENIA - BARRIO GALAN	TELEARMENIA - BARRIO GALAN	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
8	QUI-AR-SC99-P5	ARMENIA	PARQUE URIBE	PARQUE URIBE	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
9	QUI-AR-SC99-Q	ARMENIA	ARMENIA CRQ	ARMENIA CRQ	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS, DATOS ENSAYOS QUÍMICOS
10	QUI-AR-SC99-T1-M3	ARMENIA	BARRIO BRASILIA	BARRIO BRASILIA	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
11	QUI-AR-SC99-T4-M2	ARMENIA	BARRIO MODELO	BARRIO MODELO	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
12	QUI-AR-SC99-T5-M1	ARMENIA	SALIDA A CALARCA	SALIDA A CALARCA	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS
13	QUI-AR-SC99-T8-M1	ARMENIA	CAR QUINDIO	CAR QUINDIO	Stv1-Stfv	0º - 10º	Vfi	ML-CL	CUMPLE PARCIALMENTE CON LOS CRUCES- TIENE INFORMACIÓN DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN DE INTERÉS

Tabla 5.18

Puntos de muestreo seleccionados de base de datos – municipio de Barranquilla – Sector Loma Roma ((zona piloto 3). En rojo los puntos que no tienen coordenadas. (fuente propia))

PUNTOS DE EVALUACION BARRANQUILLA - BASE DE DATOS									
PUNTOS	SONDEO	MUNICIPIO	NORTE	ESTE	UNIDAD GEOLOGICA	PENDIENTE	SUB UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	MATERIALES GEOTECNICOS	OBSERVACIONES
1	ATL-BRR-NA-P45-	Sector Loma Roja	Calle 63 B - Carrera 10	Calle 63 B - Carrera 10	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
2	ATL-BRR-NA-P48-	Sector Loma Roja	Calle 57 (Calle Jesus) - Carrera 9	Calle 57 (Calle Jesus) - Carrera 9	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
3	ATL-BRR-NA-P49-	Sector Loma Roja	Calle 57 (Calle Jesus) - Carrera 9M	Calle 57 (Calle Jesus) - Carrera 9M	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
4	ATL-BRR-NA-P50	Sector Loma Roja	Carrera 11 - Calle 64	Carrera 11 - Calle 64	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
5	ATL-BRR-NA-P51-	Sector Loma Roja	Calle 72 B - Carrera 15 E, Entrada por la Carrera 13	Calle 72 B - Carrera 15 E, Entrada por la Carrera 13	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
6	ATL-BRR-NA-P52-	Sector Loma Roja	Calle 72 B - Carrera 15 E, Entrada por la Carrera 13	Calle 72 B - Carrera 15 E, Entrada por la Carrera 13	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
7	ATL-BRR-NA-P53-	Sector Loma Roja	Calle 72 B - Carrera 15 E, Entrada por la Carrera 13	Calle 72 B - Carrera 15 E, Entrada por la Carrera 13	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
8	ATL-BRR-NA-P54	Sector Loma Roja	Calle 83 - carrera 41 E	Calle 83 - carrera 41 E	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO BASE DE DATOS QUE CUMPLEN CON TODOS LOS CRUCES DE INFORMACION-
9	ATL-BRR-NA-P55-	Sector Loma Roja	-	-	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO TIENE COORDENADAS PERO TIENE INFORMACION CORRELACIONABLE DE RESISTENCIA Y DEFORMACION
10	ATL-BRR-NA-P56	Sector Loma Roja	-	-	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO TIENE COORDENADAS PERO TIENE INFORMACION CORRELACIONABLE DE RESISTENCIA Y DEFORMACION
11	ATL-BRR-NA-P57	Sector Loma Roja	-	-	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO TIENE COORDENADAS PERO TIENE INFORMACION CORRELACIONABLE DE RESISTENCIA Y DEFORMACION
12	ATL-BRR-NA-P58	Sector Loma Roja	-	-	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO TIENE COORDENADAS PERO TIENE INFORMACION CORRELACIONABLE DE RESISTENCIA Y DEFORMACION
13	ATL-BRR-NA-P59	Sector Loma Roja	-	-	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO TIENE COORDENADAS PERO TIENE INFORMACION CORRELACIONABLE DE RESISTENCIA Y DEFORMACION
14	ATL-BRR-NA-P60	Sector Loma Roja	-	-	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO TIENE COORDENADAS PERO TIENE INFORMACION CORRELACIONABLE DE RESISTENCIA Y DEFORMACION
15	ATL-BRR-NA-P61	Sector Loma Roja	-	-	Stfv+Srv	3º - 10º	Vfl	CH-CL	PUNTO CERCANO EN ZONA DE INFLUENCIA QUE NO TIENE COORDENADAS PERO TIENE INFORMACION CORRELACIONABLE DE RESISTENCIA Y DEFORMACION

### **5.3 Resultados de análisis estadístico de información geotécnica de base de datos por zona piloto para caracterización básica y geomecánica**

Con base en la información recopilada por zona piloto se tienen las tablas que consolidan los resultados por zona; se desarrolló un análisis preliminar de parámetros básicos de propiedades índice y las propiedades de resistencia y deformación por sondeo, los resultados del análisis se presentan en el anexo 5.2. Para el desarrollo de análisis estadísticos con base en la información existente se establecieron dos niveles litológicos que en total cubren una profundidad media en las tres zonas piloto de 15 metros y que presentan comportamientos que pueden ser diferenciados, sin embargo, análisis posteriores pueden llevar a la unificación de un nivel único; se tiene un nivel litológico A entre 0 y 5.0 metros de profundidad media y un nivel litológico B hasta 15.0 metros de profundidad aproximadamente; en los dos niveles se tienen suelos predominantemente arcillosos con algunas intercalaciones de limos, sin embargo en el nivel litológico A se tienen materiales con niveles de sobreconsolidación superiores, por lo cual se definió esta diferenciación.

A partir de la identificación de niveles litológicos, se efectuó un análisis estadístico respecto al comportamiento de las variables de caracterización básica y propiedades geomecánicas por nivel litológico, tal como se presenta en el anexo 5.2.1 para la zona piloto 1, 5.2.2 para la zona piloto 2 y 5.2.3 para la zona piloto 3.

Con base en el análisis estadístico de propiedades básicas efectuado por zona piloto, se efectuó un análisis consolidado que incluye las propiedades básicas y de resistencia dadas por la resistencia a la compresión confinada, ensayo generalizado para los estudios en sus propiedades mecánicas. Igualmente, y con base en diferentes correlaciones entre las propiedades básicas y comportamientos especiales asociados a la actividad, colapsabilidad y grado de expansión se efectuó un análisis a partir de diferentes autores, tal como se presentará posteriormente para cada zona piloto.

De los resultados del análisis de la información geotécnica secundaria se pudo concluir que del total de ensayos ejecutados solo el 1.8% corresponde a análisis químicos, es decir prácticamente no se han desarrollado análisis para el estudio de la microfabrica de los materiales en las zonas de estudio; igualmente de estos ensayos solo el 4% corresponde a análisis de resistencia y deformación,

estando concentrada la información en los ensayos de caracterización básica. Estos ensayos de caracterización básica permiten identificar en profundidad la existencia de materiales que se puedan clasificar como arcillas, arcillas limosas o limos arcillosos de acuerdo con la clasificación USC, sin embargo, para los fines de esta investigación no aporta más información de importancia respecto del comportamiento geomecánico de los materiales.

#### **5.4 Resultados de exploración geotécnica por zona piloto y perfiles estratigráficos para Sabana de Bogotá y Quindío.**

Siguiendo la metodología que se ha descrito previamente y como resultado de los análisis de la información secundaria se desarrollaron las actividades de perforación y muestreo para las zonas piloto de Sabana de Bogotá y Quindío respectivamente, dado que en el municipio de Barranquilla los análisis se realizaron con la información existente. Las muestras recuperadas fueron cubiertas con papel vinipel y posteriormente guardadas en cajas de muestras para evitar al máximo su alteración. Posteriormente y a su llegada a Bogotá fueron almacenadas hasta el desarrollo de los ensayos de laboratorio.

Como se ha descrito en párrafos previos, los análisis se efectuaron sobre muestras de materiales predominantemente arcillosos obtenidos durante los trabajos de exploración geotécnica desarrollados por el SGC en desarrollo del proyecto “Caracterización Geotécnica de Arcillas” desarrollado entre 2019 y 2021; contando con autorización previa de la Dirección de Laboratorios del SGC se cuenta con datos de ensayos de laboratorio físicos y químicos realizados sobre dos sondeos para el municipio de Tabio y dos para los municipios de Tebaida y Montenegro respectivamente en el departamento del Quindío; igualmente se realizaron ensayos de compresión triaxial, consolidaciones y caracterización básica en la Universidad Militar Nueva Granada en su sede de Cajicá. Para la obtención de las muestras se usó un equipo de perforación mecánica por rotoperCUSión (motor Lombardini) con broca diamantina y recuperación continua de núcleos de diámetro NQ entre los 2 y 15 metros de profundidad; en los casos requeridos para estabilizar se usó lodo bentonítico.

#### 5.4.1 Exploración y muestreo Municipio de Tabio – Sabana de Bogotá

El material muestreado corresponde a suelos predominantemente arcillosos y arcillo limosos transportados, Fluvio Lacustres de la Formación Sabana (Stflsa), específicamente los materiales de la subunidad geomorfológica Fpla (Planicies y deltas lacustrinos); en la tabla 5.19 se presentan los puntos de exploración que se analizaron en laboratorio en el municipio de Tabio en el departamento de Cundinamarca en donde se identifica el número de muestras obtenida por sondeo:

*Tabla 5.19  
Localización sondeos, profundidad y numero de muestras Zona Piloto 1- municipio de Tabio- Sabana de Bogotá*

<b>Localización Sondeos con Recuperación de muestra zona piloto 1 - Sabana de Bogotá</b>					
<b>Sondeo</b>	<b>Municipio</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Profundidad alcanzada (m)</b>	<b>Muestras Tomadas</b>
TAB -1	Tabio	4°54'30.09"N	74° 5'43,05"O	14,7	11
S-2	Tabio	1.034.460	998.619	15	11

De acuerdo con la descripción de las muestras de campo, el perfil del subsuelo en la zona de exploración está conformado superficialmente por una capa delgada de suelo orgánico tipo limo orgánico (MH) hasta aproximadamente 1.0 mts de profundidad, seguido de una capa de arcilla (CL) entre uno y dos metros de profundidad; posteriormente nuevamente se presenta una capa de limo (ML) entre los 2.0 y 6.0 metros de profundidad; volviendo a aparecer una arcilla plástica (CL) de color gris con vetas negras de plasticidad media a alta y consistencia media a firme entre 6.0 y 8.5 metros con una delgada capa de limo (ML) intercalado entre 8.5 y 9.0 volviendo a aparecer la arcilla hasta los 15.0 metros de profundidad.

En la Figura 5.5 se presenta la localización de los puntos de exploración en color rojo y se ubican también los puntos de sondeos de información secundaria que se definieron para el área de estudio; igualmente en las Figura 5.6 y Figura 5.7 se presentan los perfiles completos de las perforaciones y en la Figura 5.8 las imágenes de los trabajos de exploración geotécnica; se

diferenciaron inicialmente tres niveles litológicos tal como se muestra en las Figuras. Cada nivel se denota por las letras A, B y C, así como el tipo de muestra tomada.

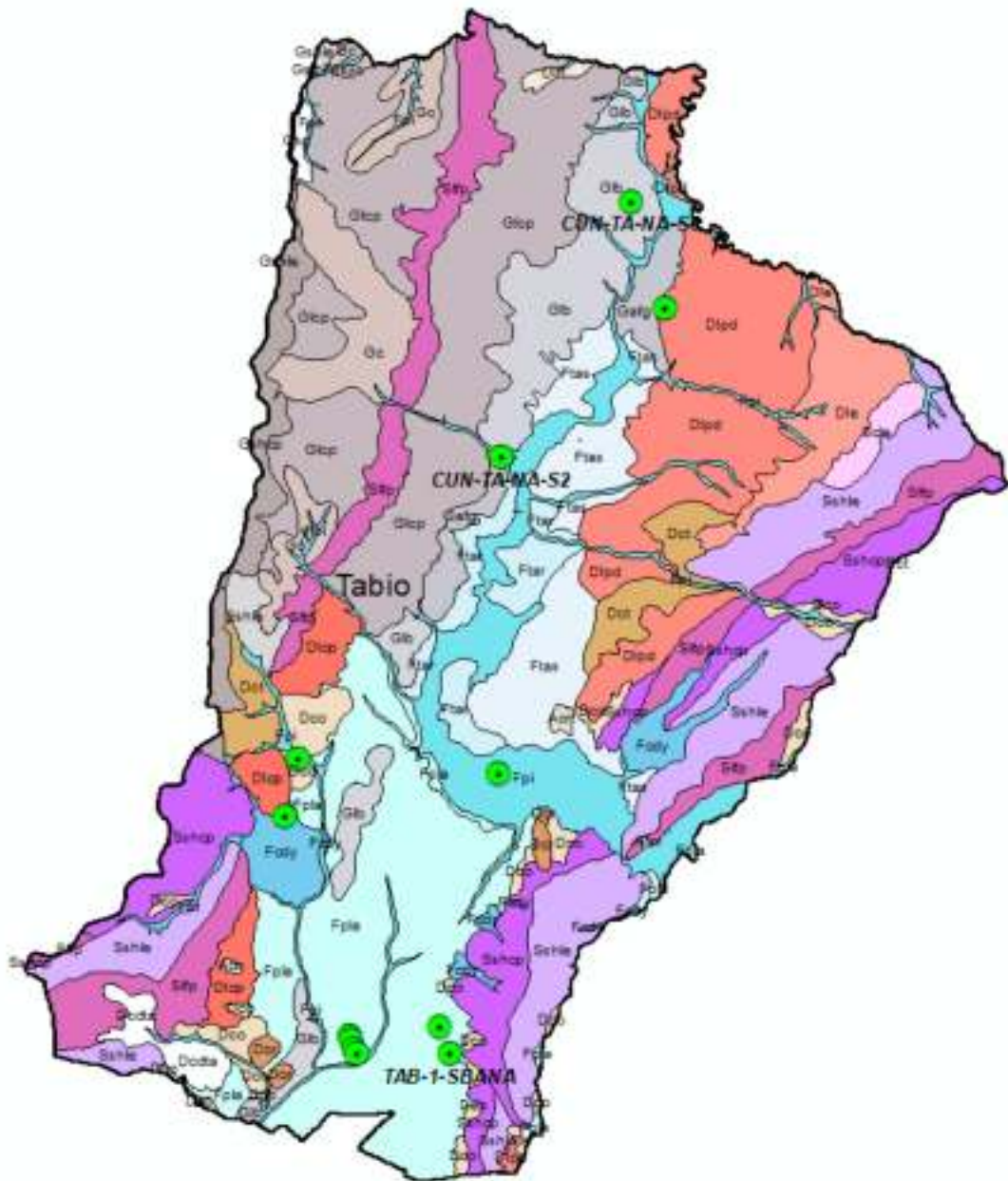


Figura 5.5 Localización de los puntos de exploración en el municipio de Tabio- Sabana de Bogotá (Fuente: Elaboración propia).








		sondeo 5-2- Municipio de Tablo- 2019					
MUESTRA			DESCRIPCIÓN VISUAL DEL SUELO			NF	
No.	Prof. (m)	Tipo					
NIVEL LITOLÓGICO A	1	0,0 / 0,60	SH	Capa vegetal color negro, Contenido de materia orgánica, humedad media plasticidad baja, consistencia firme			
	2	0,60 / 1,20	SH	Arcilla de color caramelo oscuro con vetas de oxidación, humedad media plasticidad media consistencia firme.			
	3	1,20 / 2,50	SH	Arcilla de color gris claro humedad media plasticidad media consistencia firme.			
	4	2,50/4,0	SH	Arcilla de color gris claro, contenido de arenas finas consistencia firme		3,2 mts	
	5	4,00 / 5,50	SH	Arcilla de color gris con vetas negras, humedad media, consistencia firme			
NIVEL LITOLÓGICO B	6	5,50 / 7,0	SH	Arcilla de color gris oscuro humedad media plasticidad media, consistencia firme			
	7	7,0 / 8,50	SH	Arcilla de color gris con algo de arenas finas, humedad media, plasticidad media consistencia firme			
	8	8,50 / 10,0	SH	Arcilla de color gris con vetas negras, contenido de arenas finas. Humedad media plasticidad media consistencia firme			
	9	10,00 / 11,50	SH	Arcilla de color gris oscuro con vetas negras, contenido de arenas finas, humedad media, plasticidad media, consistencia firme			
	10	11,50 / 13,00	SH	Arcilla de color gris oscuro, humedad media, plasticidad media, consistencia firme.			
	11	13,00 / 15,00	SH	Arcilla de color caramelo oscuro con vetas negras, humedad media, plasticidad media consistencia firme			

Figura 5.6 Perfil litológico de la perforación S2 en Tablo- Sabana de Bogotá.

sondeo TAB-1- Municipio de Tablo- 2019				
MUESTRA			DESCRIPCIÓN VISUAL DEL SUELO	NF
No.	Prof. (m)	Tipo		
1	0,0/0,50	SH	Limo orgánico color negro, humedad media, plasticidad baja consistencia media	
2	0,50/1,0	SH	Limo organico color negro a café oscuro, consistencia firme, plasticidad media, humedad media.	
3	1,0/1,50	SH	Arcilla limosa color café oscuro, inicio limo arenoso humedad media plasticidad media consistencia firme.	
4	2,60/3,10	SH	Arcilla de color carmelito medio a gris verdoso con vetas de oxidacion Humedad media plasticidad media consistencia media	
5	3,10/3,60	SH	Arcilla carmelita oscura con vetas de oxidacion a color gris, humedad media, plasticidad media, consistencia firme.	
6	4,10/4,70	SH	Arcilla de color gris oscuro con vetas de oxidacion y raices. Humedad media, plasticidad media, consistencia firme.	
7	4,70/5,20	SH	Arcilla color carmelito oscuro con vetas de oxidacion a color gris oscuro. Humedad alta consistencia media, plasticidad alta.	
8	7,20/7,80	SH	Arcilla de color gris oscura, humedad media, plasticidad alta consistencia blanda.	
9	7,80/7,80	SH	Arcilla de color gris oscura, plasticidad alta, humedad alta, consistencia media.	
10	11,0/11,60	SH	Arcilla de color gris oscura humedad alta, plasticidad alta, consistencia blanda	
11	14,0/14,70	SH	Arcilla con algo de limo gris oscuro a verdoso, humedad media, plasticidad media, consistencia media	

NIVEL LITOLÓGICO A

NIVEL LITOLÓGICO B

Figura 5.7 Perfil litológico de la perforación TAB1 en Tablo- Sabana de Bogotá.



a)



b)



c)



d)

*Figura 5.8 a) Equipo de perforación; b) Detalle montaje equipo de; c), d) Muestra recuperada de material arcilloso con vetas oscuras.*

#### 5.4.2 Exploración y muestreo Municipios de Montenegro y Tebaida – Departamento de Quindío

El material muestreado corresponde a suelos predominantemente arcillosos y arcillo limosos del Glacis del Quindío identificados en la UGS como Flujo volcánico y suelo residual (Stfv+ Srv), específicamente los materiales de la unidad geomorfológica Vf12 (Flujos de Lahar); igual que para el municipio de Tabio se tomaron datos de dos perforaciones una en el municipio de Montenegro MN-1 y una en el municipio de Tebaida TEB-3. En la Tabla 5.20 se muestran las coordenadas de los puntos de exploración sobre los cuales se efectuaron los análisis de laboratorio y el número de muestras que se obtuvo de cada sondeo.

*Tabla 5.20  
Localización sondeos, profundidad y numero de muestras Zona Piloto 2- municipio de Tabio- Sabana de Bogotá*

<b>Localización Sondeos con Recuperación de muestra zona piloto 2 - QUINDIO</b>					
<b>Sondeo</b>	<b>Municipio</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Profundidad alcanzada (m)</b>	<b>Muestras tomadas</b>
TB-3	La Tebaida	4°26'40.28"N	75°49'36.94"O	14	9
MN-1	Montenegro	4°29'11.55"N	75°48'34.29"O	13,4	8

En la Figura 5.9 se presenta la localización de los puntos de exploración en color rojo y se ubican también los puntos de sondeos de información secundaria que se definieron para el área de estudio En las figuras 5.10 y 5.11 se presentan los perfiles litológicos para las perforaciones indicadas en los cuales se diferenciaron y muestrearon tres niveles litológicos, tal como en Sabana de Bogotá. Cada nivel se denota por las letras A, B o C y las muestras por la letra SH y un número consecutivo que aumenta con la profundidad; en la figura 5.12 se muestran algunas imágenes de los puntos de sondeo indicados.

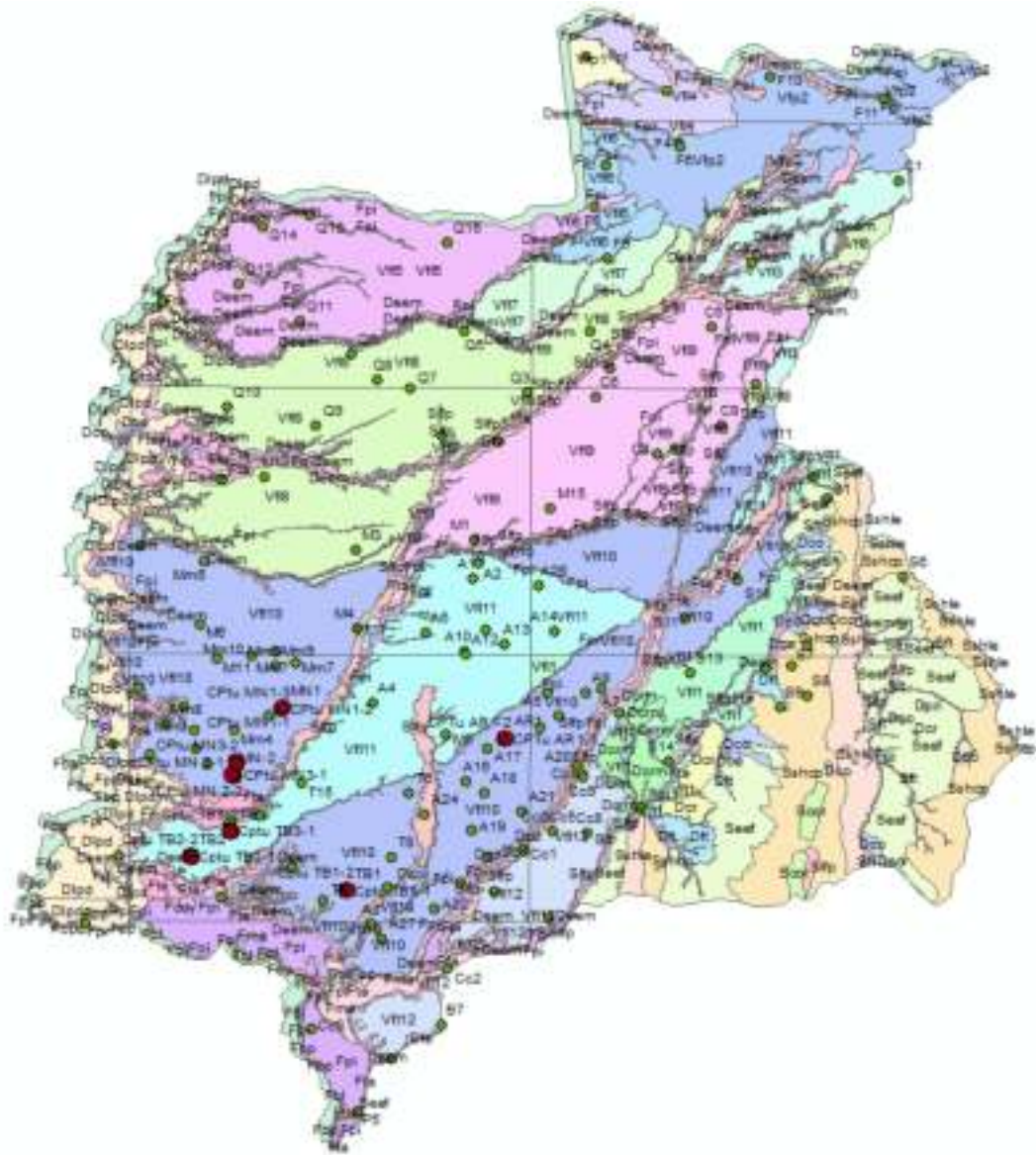


Figura 5.9 Localización de los puntos de exploración en el municipio de Quindío. En color rojo se identifica la exploración geotécnica desarrollada entre 2019 y 2021 y en color verde los puntos de exploración producto de la información secundaria existente (Fuente: Elaboración propia)



**NIVEL LITOLÓGICO A**  
**NIVEL LITOLÓGICO B**


sondeo MN-1- Municipio de Montenegro - 2021				
MUESTRA			DESCRIPCIÓN VISUAL DEL SUELO	NF
No.	Prof. (m)	Tipo		
1	0,0/0,60	SH	Limo arcilloso de color carmelito, humedad media, plasticidad media consistencia media.	 No se encontró nivel freático
2	0,60/1,20	SH	Limo arenoso de color carmelito, humedad media, plasticidad media consistencia media.	
3	2,60/3,20	SH	Arcilla de color amarillo con algo de arena fina, humedad media plasticidad alta y consistencia media.	
4	4,40/5,0	SH	Arcilla amarilla con algo de arena fina, humedad media plasticidad media, consistencia media.	
5	6,20/6,80	SH	Arcilla limosa con algo de arena fina, humedad media plasticidad media consistencia media.	
6	9,0/9,60	SH	Limo arcilloso de color amarillo humedad media plasticidad media y consistencia media.	
7	11,40/12,0	SH	Arcilla con algo de arenas finas de color carmelito con rastros de oxidacion, consistencia blanda.	
8	13,40/14,0	SH	Arcilla de color carmelito, bajo contenido de arena plasticidad media a alta consistencia blanda.	

Figura 5.10 Perfil litológico de la perforación MN-1 en Montenegro – Quindío

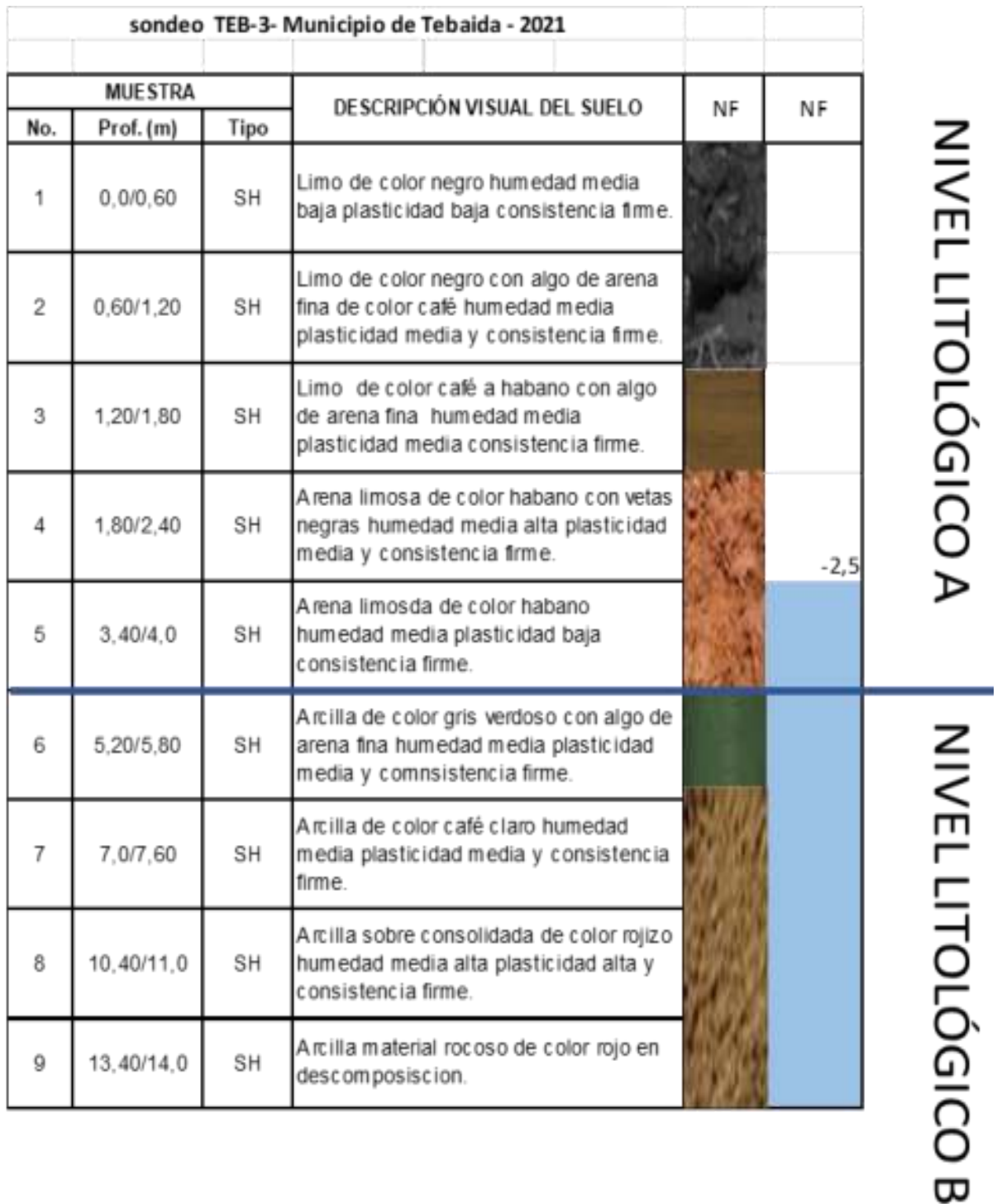


Figura 5.11 Perfil litológico de la perforación TEB-3 en La Tebaida– Quindío



a)



d)



b)



e)



c)



f)

*Figura 5.12 a) Panorámica zona de muestreo; b) Equipo de perforación; c), d), e) f) Detalle de sistema de muestreo y muestra obtenida.*



En resumen, de la exploración directa usada para esta investigación, en la zona piloto 1; municipio de Tabio se tienen datos directos de 29.7 metros de exploración con recuperación de 22 muestras inalteradas y para la zona piloto 2, municipios de Montenegro y Tebaida 27.4 metros de exploración con recuperación de 17 muestras inalteradas.

### **5.5 Construcción de modelos y perfiles geológicos por zona piloto con el uso del programa QGIS versión 3.4.8. y AutoCAD 2018**

Con base en la información secundaria y la información producto de exploración directa tomada para este trabajo, para cada zona piloto se realizaron perfiles geológicos mediante el uso de los programas QGIS versión 3.4.8. y AutoCAD 2018, usando como insumos la información geológica de las zonas, las coordenadas que permitieron obtener las alturas de los puntos de exploración y los perfiles estratigráficos de campo que se obtuvieron para las perforaciones producto de información secundaria y los perfiles estratigráficos obtenidos de la exploración directa. Es importante anotar que dada la profundidad de las exploraciones que oscila entre 10 y 15 metros de profundidad se usó como información geológica de entrada los datos de Unidades Geológicas Superficiales - UGS que se describieron en capítulos iniciales. Esta información permite la observación de las zonas piloto finalmente seleccionadas con el fin de generar un modelo geológico 2D y generar una sección transversal tipo de análisis.

Igualmente, dado que no se cuenta con los datos de la elevación de cada perforación (pues este solo registraba la latitud y altitud en cada una de las perforaciones), se usó el programa QGIS y el programa MagnaSirgras5.1 de la base de datos abiertos proporcionado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en Colombia, para obtener las alturas de cada punto con la mejor precisión posible que ajuste al modelo de elevación DEM utilizado con una precisión 12.5m.

Para efectuar este trabajo se usó la siguiente información base:

1. Entrada de coordenadas GPS con conexión directa a Google Maps.
2. Construcción de formatos unificados de campo tanto para la información secundaria como para la información primaria.

3. Exportación a programas seleccionados de CAD.
4. Creación de perfiles geológicos tipo y secciones transversales.

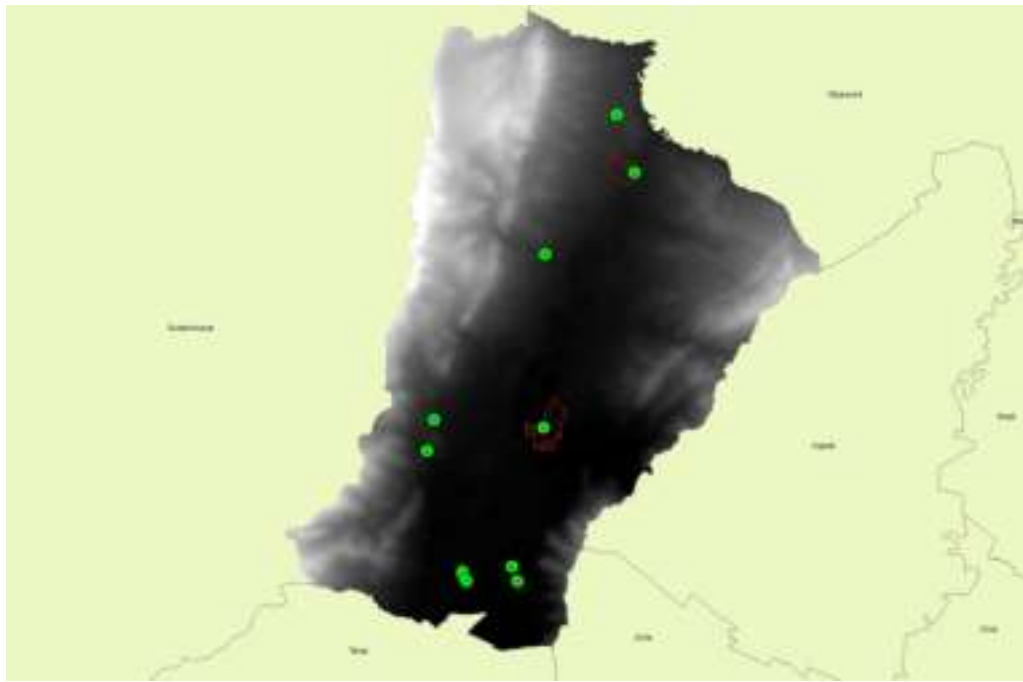
Durante el modelado, se desarrolló el siguiente procedimiento de entrada:

1. Identificación del polígono local de estudio por zona piloto y localización de los puntos de exploración geotécnica: Con la información obtenida de las perforaciones realizadas y de la información secundaria existente, se generaron las coordenadas de los puntos con base en el sistema Magna Sirgas 5.1 de la base de datos abiertos proporcionado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Figura 5.13), asociadas a altura de cada punto y con base en las cuales se generó un modelo 3D de las zonas de estudio tal como se observa en la Figura 5.15.



*Figura 5.13 Localización puntos de exploración geotécnica información secundaria y directa en Sabana de Bogotá (fuente propia)*

2. Crear de un modelo de terreno – DTM en QGIS: Usando entonces un modelo de elevación DEM de curvas de nivel cada 12.5m, y utilizando las coordenadas en formato Gauss Kruger, se generó la ubicación en tres dimensiones de cada uno de los puntos:



*Figura 5.14 Ubicación de los puntos de exploración en modelo DTM \_ Sabana de Bogotá (fuente propia)*

3. Entrada de datos de perforaciones: Se registran los datos básicos de cada una de perforaciones sus capas (tipo de material) y las profundidades de estas. Posteriormente, con el modelo de elevación creado, es posible crear los perfiles longitudinales en los sectores donde se quiere analizar con más facilidad.
4. Construcción de perfiles: Con esta información también se crearon polilíneas a las cuales se les aplicaron los atributos del modelo de elevación, para generar líneas tridimensionales que representan el perfil longitudinal utilizado para el desarrollo de los perfiles geológicos, tal como se presenta a modo de ejemplo en la Figura 5.15. Dado que las líneas no pasan por todos los puntos de exploración se requiere efectuar un ajuste, sin que eso represente mayores incertidumbres en la información debido a la selección de las zonas de estudio previamente descrita. Se debe tener en cuenta que las características de los datos de las

perforaciones son revisadas de manera manual y verificadas antes de la proyección del perfil geológico, esto con el fin de comprobar la estratigrafía de los sondeos y con esto conseguir una adecuada validez del perfil representado.



*Figura 5.15 Polilíneas aplicadas para el modelo en Sabana de Bogotá (fuente propia)*

5. Generación de modelo 2D para la estratigrafía: Debido a las limitaciones que se tienen en información, los modelos de interpolación que se utilizan pueden generar datos imprecisos entre más se alejen de los puntos de las perforaciones. Esto es debido naturalmente a que existe una distancia considerable entre cada perforación registrada y utilizada para este modelo. También vale la pena mencionar que la estratigrafía en general puede obtener mejores resultados con más información a la que se tiene y con la cual se cuenta y que el comportamiento geológico-geotécnico real de los suelos depende de muchas más variables que las interpolaciones no contemplan.
  
6. Procedimiento para obtener el modelo 2D: se realiza una interpolación en 2D junto con perforaciones de profundidades similares para obtener un comportamiento inicial del modelo matemático respecto a los puntos, Una vez el perfil es obtenido en QGIS, este se exporta a AutoCAD para la creación del modelo geológico para luego realizar en cada uno de los tramos un perfil y efectuar un análisis conjunto de todos los sondeos utilizados para el análisis, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 5.16



*Figura 5.16 Esquema de localización de perfiles estratigráficos, información geotécnica e interpretación estratigráfica del perfil (fuente propia)*

Con base en la información de cada perfil se efectúa un análisis conjunto de la información y se define la posible configuración de estratos que tiene el perfil geotécnico. Esto se hace teniendo en cuenta los comportamientos de otros modelos previamente documentados y por criterio experto del autor. Se obtiene como resultado un perfil al cual se le especifican las convenciones y el tipo de suelo que se encuentra en cada perfil estratigráfico. Se agrega información importante como la elevación que tiene el perfil, el nombre del sondeo y la longitud del perfil. Debido a la gran longitud de los perfiles, se optó por desarrollar un cuadro de convenciones donde se especifique el tipo de suelo que se encuentra con mayor detalle.

Por cada zona piloto se generó un DTM, un modelo 2D y dos o más secciones transversales tipo a partir de la información de UGS y los perfiles de campo. De las Figuras 5.17 a 5.24 se presenta el resultado de este trabajo. Los modelos permitieron evidenciar que los resultados del modelo geológico – geomorfológico propuesto para selección de zonas de estudio generó los resultados esperados, seleccionando zonas que cumplen con los requerimientos de aspectos fisiográficos (pendientes y morfología), geotécnicos (suelos predominantemente arcillosos), aspectos genéticos y climáticos bien diferenciados que permiten tener parámetros de control para contrastar los resultados de condiciones esfuerzo – deformación de los suelos analizados.

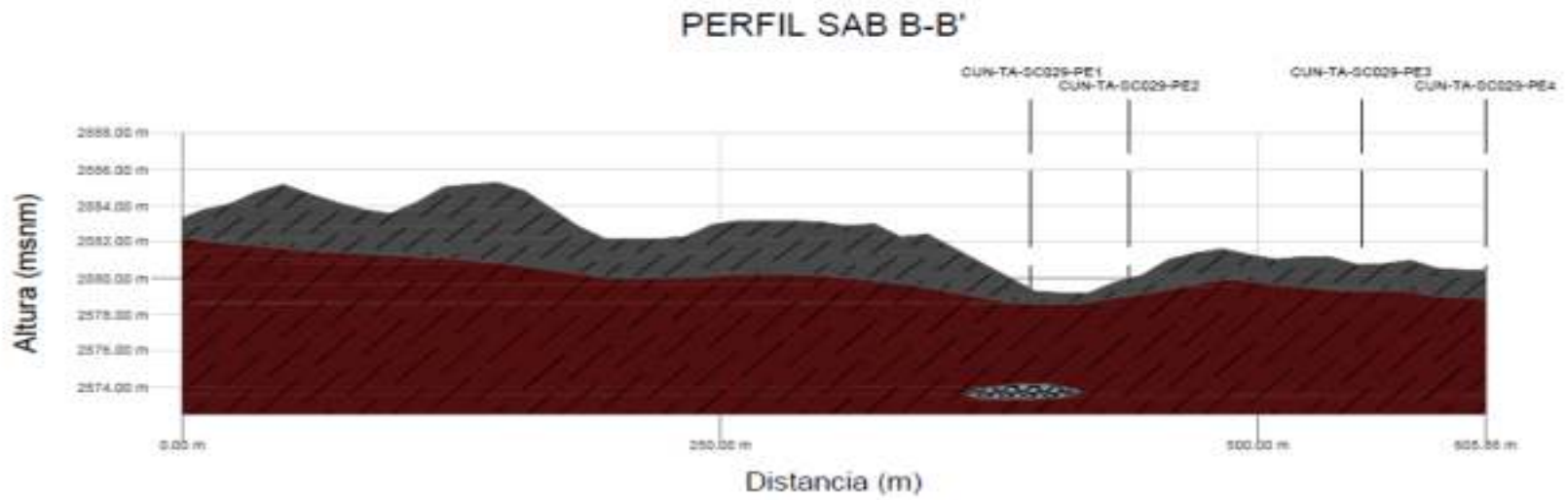
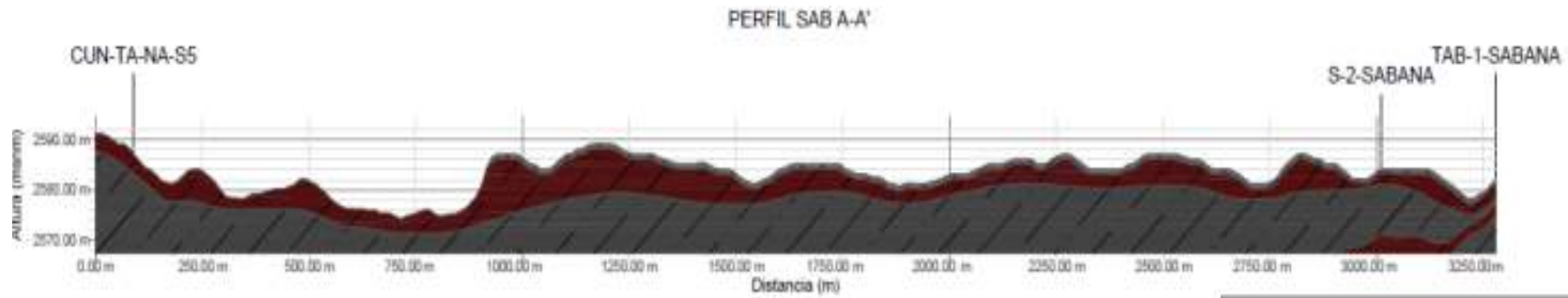


Figura 5.17 Perfiles geológico- geotécnico tipo Sabana de Bogotá- Municipio de Tabio- Parte A (fuente propia).



PERFIL SAB A-A'

ID	NORTES (m)	ESTES (m)	ALTURA (metros)
C2-SABANA	1034450.74	998619.38	2583.16
TAB-3-SABANA	1034152.26	998727.83	2582.15
CUN-TA-NA-S1	1042564.09	1001111.01	2650.04
CUN-TA-NA-S2	1040871.06	999275.56	2675.03
CUN-TA-NA-S3	1037465.18	997006.32	2685.15
CUN-TA-NA-S4	1036623.81	996857.67	2637.15
CUN-TA-NA-S5	1037100.30	995263.31	2588.14
CUN-TA-NA-S6	1043757.27	1000728.38	2719.02
CUN-TA-SC029-PE1	1034350.00	997600.00	2576.16
CUN-TA-SC029-PE2	1034306.00	997634.00	2580.16
CUN-TA-SC029-PE3	1034202.00	997652.00	2576.16
CUN-TA-SC029-PE4	1036222.06	997787.08	2582.16



PERFIL SAB B-B'

ID	NORTES (m)	ESTES (m)	ALTURA (metros)
C2-SABANA	1034450.74	998619.38	2583.16
TAB-3-SABANA	1034152.26	998727.83	2582.15
CUN-TA-NA-S1	1042564.09	1001111.01	2650.04
CUN-TA-NA-S2	1040871.06	999275.56	2675.03
CUN-TA-NA-S3	1037465.18	997006.32	2685.15
CUN-TA-NA-S4	1036623.81	996857.67	2637.15
CUN-TA-NA-S5	1037100.30	995263.31	2588.14
CUN-TA-NA-S6	1043757.27	1000728.38	2719.02
CUN-TA-SC029-PE1	1034350.00	997600.00	2576.16
CUN-TA-SC029-PE2	1034306.00	997634.00	2580.16
CUN-TA-SC029-PE3	1034202.00	997652.00	2576.16
CUN-TA-SC029-PE4	1036222.06	997787.08	2582.16



Figura 5.18 Perfiles geológico- geotécnicos tipo Sabana De Bogotá- Municipio de Tabio- Parte B-Convenciones y coordenadas (fuente propia)



Figura 5.19 Perfiles geológico- geotécnico tipo Quindío- municipio de Montenegro- Parte A (fuente propia)



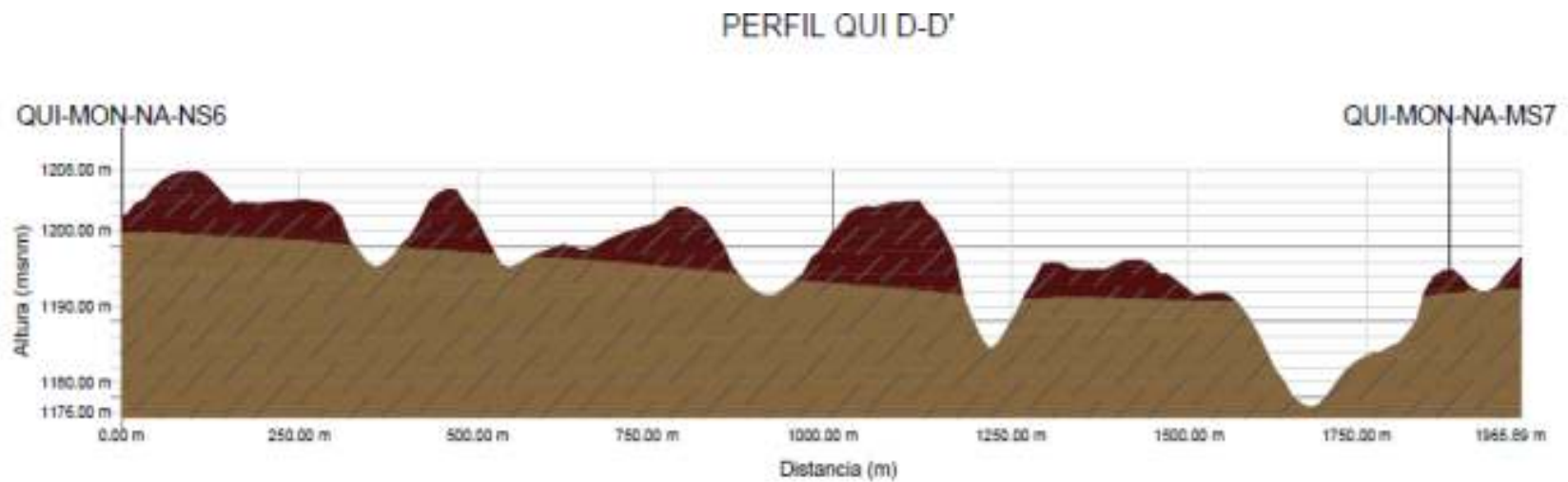
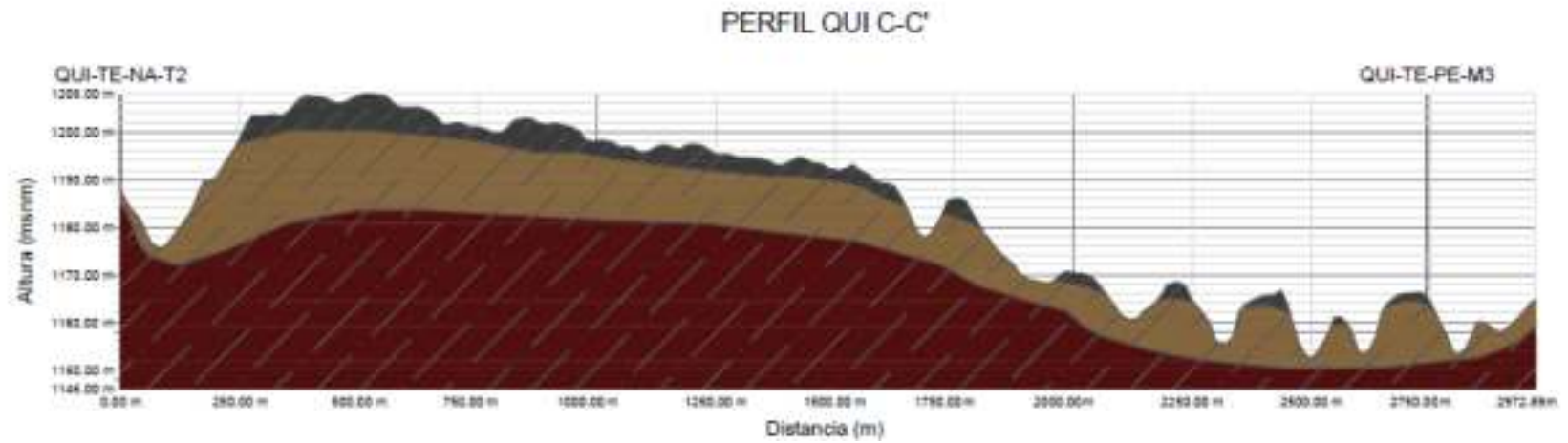


Figura 5.20 Perfiles geológico- geotécnico tipo Quindío- municipio de Montenegro y Tebaida- Parte A (fuente propia)

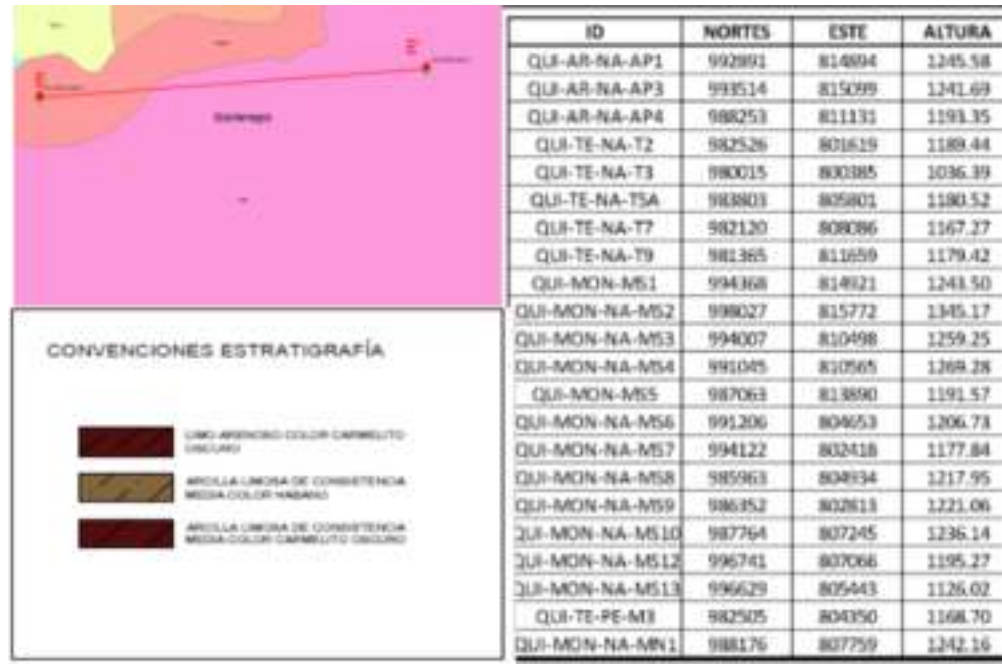
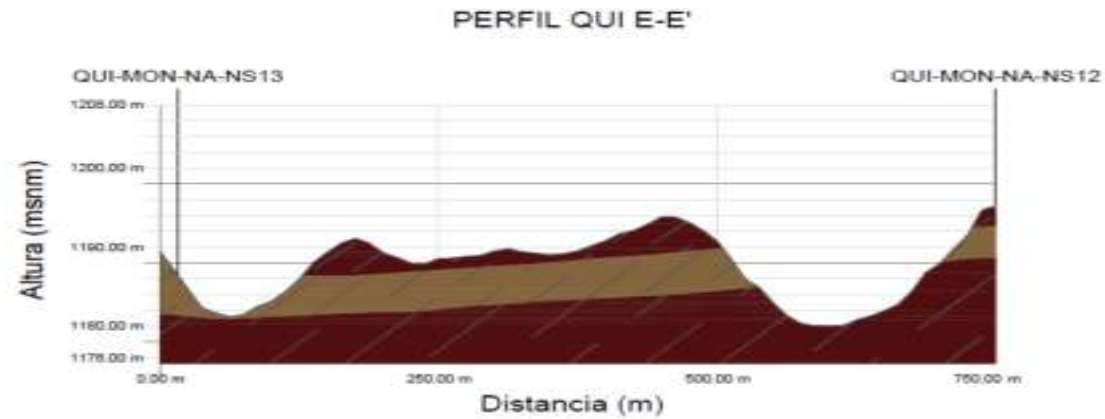


Figura 5.21 Perfiles geológico- geotécnico tipo Quindío- municipio de Montenegro- Parte A y B (fuente propia)

## PERFIL A-A' y B-B

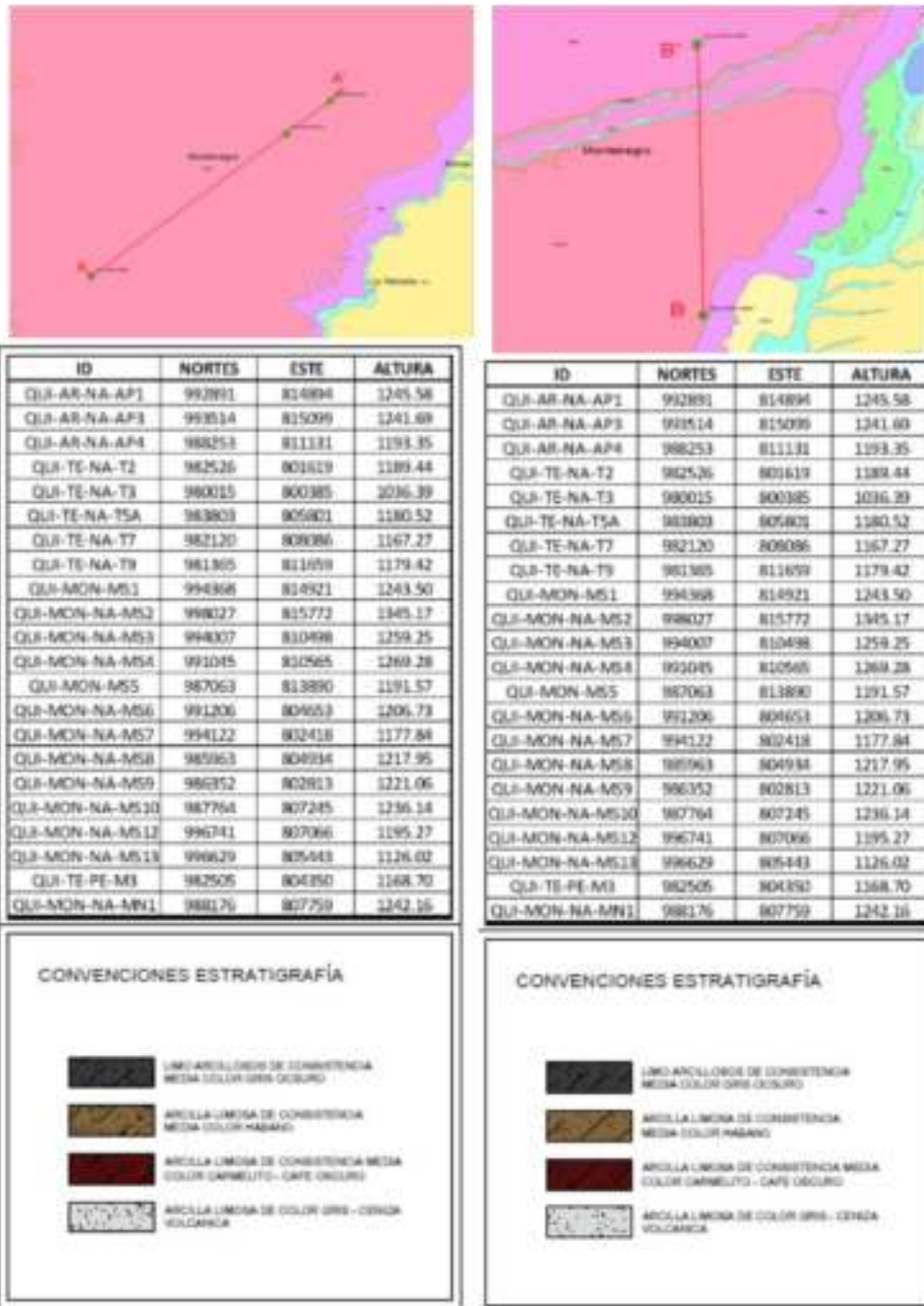


Figura 5.22 Perfiles geológico- geotécnicos Quindío- Municipio de Montenegro- Parte B- Convenciones y coordenadas (fuente propia)

## PERFIL C-C'', D-D'

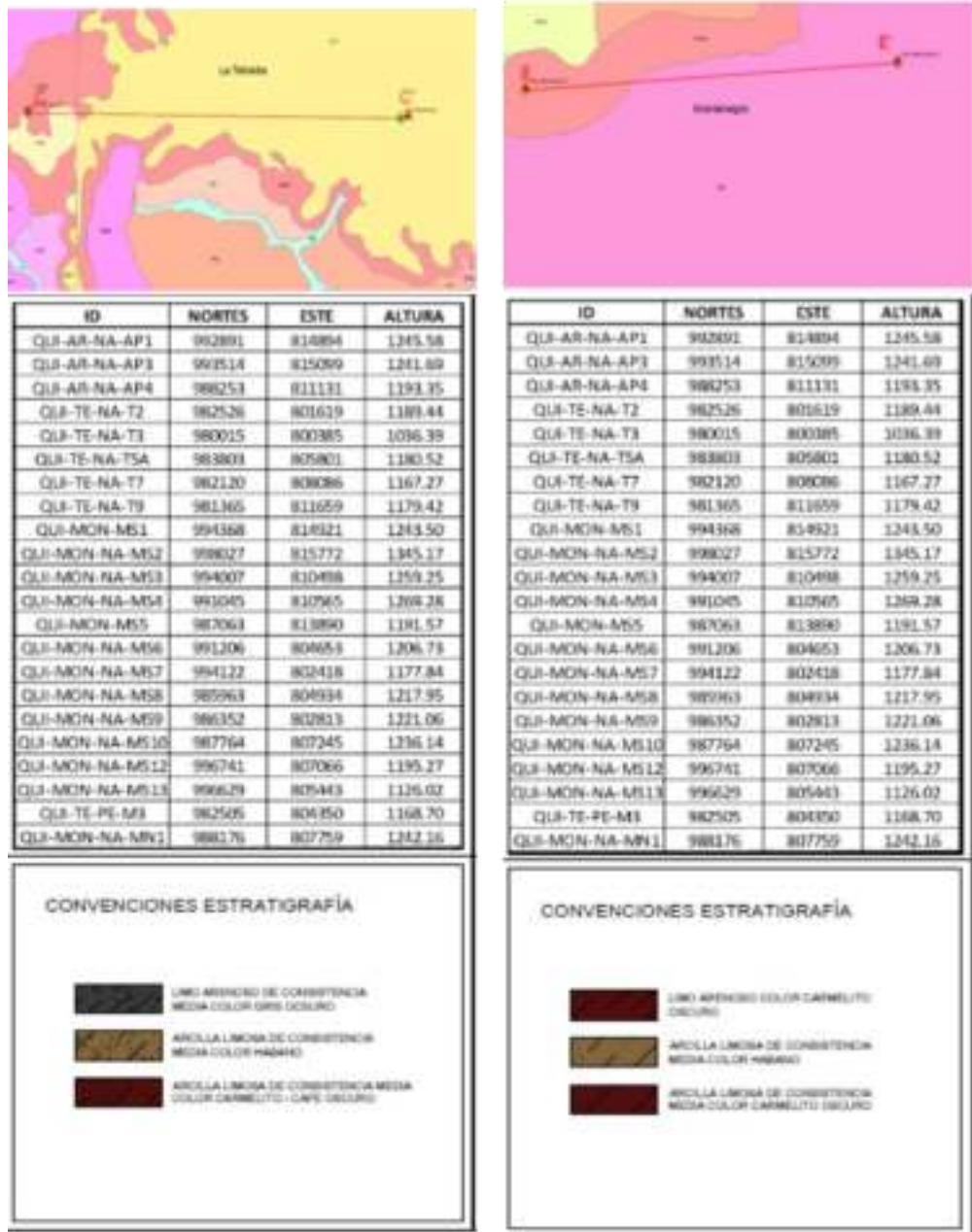


Figura 5.23 Perfiles geológico- geotécnicos Quindío- Municipio de Montenegro y Tebaida- Parte B-Convenciones y coordenadas (fuente propia)

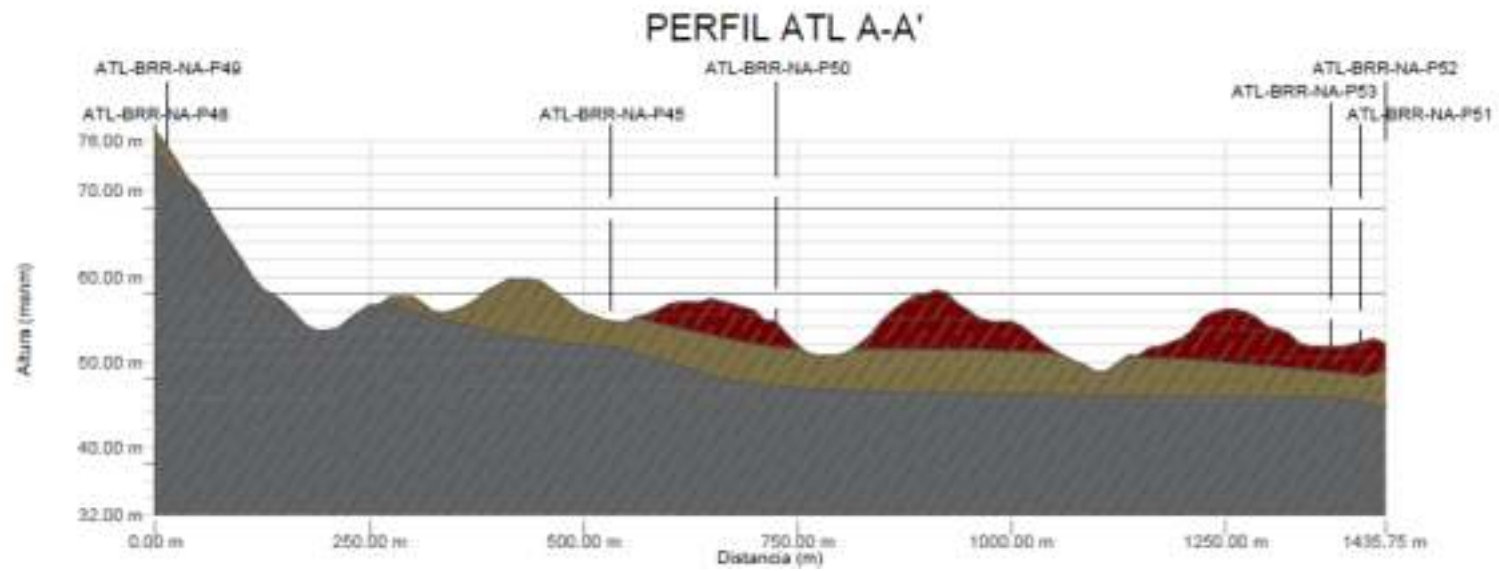


Figura 5.24 Perfiles geológico- geotécnico Barranquilla- sector Loma Roja- Parte A y B (fuente propia)

## **5.6 Resultados laboratorio físico – químico- geomecánico de muestras Sabana de Bogotá y Quindío producto de exploración geotécnica directa**

Como se ha descrito a lo largo de este documento, los análisis de comportamiento geomecánico de los suelos, parten de los análisis direccionados a la caracterización básica de los mismos, los cuales son usados a menudo para definir parámetros relacionados con posibles comportamientos especiales como el colapso, la actividad o la sensibilidad de los suelos que los lleva a tener comportamientos esfuerzo – deformación no adecuados para soportar estructuras y los análisis esfuerzo- deformación en laboratorio; igualmente algunos modelos como el modelo francés hacen uso de los datos de caracterización básica para proponer variables de esfuerzo y deformación para los suelos. Bajo esta premisa, sobre las muestras identificadas se efectuaron ensayos tanto de caracterización básica como de resistencia y deformación que permiten establecer su comportamiento bajo condiciones críticas de saturación. Las muestras fueron estudiadas en dos laboratorios distintos realizando diferentes ensayos de caracterización básica y resistencia y deformación. Los ensayos fueron realizados con la ayuda del personal técnico de cada laboratorio, a saber: Laboratorio de Geotecnia del Servicio Geológico Colombiano y Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Militar Nueva Granada.

Se seleccionaron dos sondeos por zona piloto para las zonas de Sabana de Bogotá y Quindío para la ejecución de ensayos de laboratorio; no se realizaron ensayos sobre muestras de Barranquilla ya que no se contó con exploración directa en esta zona; para Sabana de Bogotá, los sondeos identificados como S2 y TAB 1 ubicados en el municipio de Tabio en el departamento de Cundinamarca, para el departamento del Quindío los sondeos identificados como TEB-3 y MN-1 en los municipios de Tebaida y Montenegro respectivamente; los ensayos de caracterización básica y resistencia y deformación fueron realizados en la Universidad Militar Nueva Granada y algunos en el Servicio Geológico Colombiano; igualmente se presentan los datos obtenidos de ensayos químicos para determinar los minerales y elementos para los materiales identificados, los cuales fueron desarrollados en los Laboratorio del Servicio Geológico Colombiano. Se realizaron los siguientes ensayos sobre las muestras recuperadas:

- a) Ensayos convencionales de caracterización básica. En la Tablas 5.21 Y 5.22 se muestran los ensayos de caracterización básica llevados a cabo en la presente investigación.

b) Ensayos de resistencia y deformación y ensayos químicos que se presentan en las tablas 5.21 a 6.23 para las zonas piloto 1- Sabana y zona piloto 2- Quindío; igualmente y dado que se usará esta información para el análisis en la tabla 5.24 se presenta el consolidado de ensayos de resistencia y deformación existentes producto de información secundaria para la zona piloto 3- Barranquilla. Dado que uno de los objetivos de este trabajo de investigación, es analizar bajo el desarrollo de ensayos de laboratorio geotécnico geomecánico convencionales las tendencias de comportamiento en materiales finos predominantemente arcillosos en tres zonas piloto, se usaron ensayos de resistencia y deformación convencionales en laboratorio; en todos los casos y bajo la premisa de la existencia de materiales predominantemente arcillosos los ensayos de resistencia se realizaron en condiciones no drenadas y en condición crítica, es decir muestras saturadas, esto con el fin de obtener parámetros para la resistencia comparables, muestras de diámetro NQ: 2.5 pulgadas de material inalterado obtenidas con tubos shelby.



*Tabla 5.21*  
*Ensayos de caracterización básica realizados a muestras recuperadas para Sabana de Bogotá y Quindío*

<b>zona piloto</b>	<b>sondeo</b>	<b>muestra</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Número de muestras por sondeo</b>
<b>1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN BÁSICA</b>				
	S-2 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Humedad natural	11
	S-2 -Sabana	M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	GS	10
	S-2 -Sabana	M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Hidrometría	8
	S-2 -Sabana	M1, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Límites de consistencia	10
	S-2 -Sabana	M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Límites de contracción	9
Zona 1: Sabana- municipio de Tabio	TAB-1 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Humedad natural	11
	TAB-1 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	GS	11
	TAB-1 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Hidrometría	11
	TAB-1 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Límites de consistencia	11
	TAB-1 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Límites de contracción	11
	TAB-1 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	Peso unitario	11
	TAB-1 -Sabana	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11	% PT200	11
	<b>TOTAL ENSAYOS CARACTERIZACIÓN BÁSICA MUNICIPIO DE TABIO- ZONA PILOTO 1 - SABANA</b>			



Tabla 5.22

Ensayos de caracterización básica realizados a muestras recuperadas para Quindío

zona piloto	sondeo	muestra	Ensayo	Número de muestras por sondeo
1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN BÁSICA				
Zona 2: Quindío- municipios de Montenegro y Tebaida	MN-1- Montenegro	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Humedad natural	8
	MN-1- Montenegro	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	GS	8
	MN-1- Montenegro	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Hidrometría	8
	MN-1- Montenegro	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Límites de consistencia	8
	MN-1- Montenegro	M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Límites de contracción	7
	MN-1- Montenegro	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Peso unitario	8
	MN-1- Montenegro	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	% PT200	8
	TEB-3-Tebaida	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Humedad natural	8
	TEB-3-Tebaida	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	GS	8
	TEB-3-Tebaida	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Hidrometría	8
	TEB-3-Tebaida	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Límites de consistencia	8
	TEB-3-Tebaida	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	Límites de contracción	8
	TEB-3-Tebaida	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9	Peso unitario	9
	TEB-3-Tebaida	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8	% PT200	8
<b>TOTAL ENSAYOS CARACTERIZACIÓN BÁSICA MUNICIPIOS DE MONTENEGRO Y TEBaida- ZONA PILOTO 2 - QUINDIO</b>				<b>112</b>

Tabla 5.23

Ensayos de resistencia, deformación y ensayos químicos realizados a muestras recuperadas para Sabana de Bogotá y Quindío.

zona piloto	sondeo	muestra	Ensayo	condiciones del ensayo	Número de muestras por sondeo
<b>1. ENSAYOS DE DEFORMACIÓN</b>					
Zona 1: Sabana	S-2 -Sabana	M3, M5, M7, M9, M10	Compresibilidad: consolidación unidimensional en edómetro	1 ciclo de carga descarga	5
	TAB-1 Sabana	M3, M4, M6, M11		2 ciclos de carga descarga	4
	TEB-3 Quindío	M7, M8, M4		2 ciclos de carga descarga	3
Zona 2: Quindío	MN-1 Quindío	M5		2 ciclos de carga descarga	1
	MN-1 Quindío	M4, M6, M8		3 ciclos de carga descarga	3
<b>TOTAL ENSAYOS CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL</b>					<b>16</b>
<b>2. ENSAYOS RESISTENCIA</b>					
Zona 1: Sabana	S-2 -Sabana	M4, M10	Ensayo de corte directo	corte CD, velocidad 0,00714; falla pico	2
	TAB-1 Sabana	M4, M6		Corte directo CU, velocidad 0.01 mm/s; falla pico y residual	2
	MN-1 Quindío	M4, M6		Corte directo CD, velocidad 0,00714; falla pico y residual	2
Zona 2: Quindío	MN-1 Quindío	M8		Corte directo CU, velocidad 0.01 mm/s, falla pico y residual	1
	TEB-3-Quindio	M7		Corte directo en condición CU, velocidad 0.01 mm/s, falla pico y residual	1
<b>TOTAL ENSAYOS CORTE DIRECTO</b>					<b>8</b>
	S-2-SABANA	M5, M6, M7, M8			4

Zona 1: Sabana	TAB-1 SABANA	M4, M5, M6, M7, M8, M9			6
Zona 2: Quindío	MN-1 QUINDIO	M1, M2, M3, M4, M7, M8	Ensayo de compresión inconfinada	Ensayo UU - No consolidado no drenado	6
	TEB-3 QUINDIO	M1, M2, M3, M4, M6, M7, M8			7
<b>TOTAL ENSAYOS COMPRESIÓN INCONFINADA</b>					<b>23</b>
Zona 1: Sabana	TAB -1- Sabana	M7 Y M8; M10- M11	Ensayo triaxial estático	condición CU	2
Zona 2: Quindío	TEB-1 Quindío	M8-M9	Ensayo triaxial estático	condición CU	1
<b>TOTAL ENSAYOS COMPRESIÓN TRIAXIAL ESTÁTICA</b>					<b>3</b>
<b>TOTAL ENSAYOS RESISTENCIA</b>					<b>34</b>
<b>3. ENSAYOS QUIMICOS</b>					
	TAB-1-SABANA	M1, M3, M5, M7, M9, M11	Difracción rayos X - DRX		6
	TAB-1-SABANA	M1, M3, M5, M7, M9, M11	Fluorescencia - FRX		6
Zona 1: Sabana	S2-SABANA	M7, M8, M9, M11	Tamaño de partícula		4
	S2-SABANA	M7, M8, M9, M11	Difracción rayos X - DRX		4
	S2-SABANA	M7, M8, M9, M11	Fluorescencia - FRX		4
	MN-1- QUINDIO	M4, M5, M6, M8	Difracción rayos X - DRX		4
Zona 2: Quindío	MN-1- QUINDIO	M4, M5, M6, M8	Fluorescencia - FRX		4
	TEB-3- QUINDIO	M3, M5, M7, M8	Difracción rayos X - DRX		4
	TEB-3- QUINDIO	M3, M5, M7, M8	Fluorescencia - FRX		4
<b>TOTAL ENSAYOS QUIMICO</b>					<b>40</b>

*Tabla 5.24*  
*Ensayos de resistencia, deformación y ensayos químicos realizados Barranquilla – Sector*  
*Loma Roja (Producto información secundaria)*

<b>zona piloto</b>	<b>sondeo</b>	<b>muestra</b>	<b>Ensayo</b>	<b>condiciones del ensayo</b>	<b>Número de muestras por sondeo</b>
Zona 3: Barranquilla	ATL-BRR-NA-P45	M4, M8, M12	Compresibilidad: consolidación unidimensional en edómetro	1 ciclo de carga descarga	3
	ATL-BRR-NA-P46-	M4, M7			2
	ATL-BRR-NA-P47	M6, M8			2
	ATL-BRR-NA-P48-	M7			1
	ATL-BRR-NA-P49	M3, M6, M10			3
	ATL-BRR-NA-P50	M11			1
	ATL-BRR-NA-P51	M10			1
	ATL-BRR-NA-P52	M8			1
	ATL-BRR-NA-P53	M3-M5			2
	ATL-BRR-NA-P54-	M8, M12			2
	ATL-BRR-NA-P58	M3			1
	ATL-BRR-NA-P60	M5, M8			2
ATL-BRR-NA-P61	M10	1			
<b>TOTAL ENSAYOS CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL</b>					<b>22</b>
Zona 3: Barranquilla	ATL-BRR-NA-P45	M5, M9, M13	Ensayo de corte directo	Corte directo CU, velocidad 0.01 mm/s; falla pico y residual	3
	ATL-BRR-NA-P46	M5, M7			2
	ATL-BRR-NA-P47	M4, M9, M12			3
	ATL-BRR-NA-P48	M3, M7, M12			3
	ATL-BRR-NA-P49	M9a, M12			2
	ATL-BRR-NA-P50-	M7			1
	ATL-BRR-NA-P51	M11			1
	ATL-BRR-NA-P53	M4, M8			2

	ATL-BRR-NA-P54	M7, M10		2
	ATL-BRR-NA-P58	M3, M6		2
	ATL-BRR-NA-P61	M7, M14		2
<b>TOTAL ENSAYOS CORTE DIRECTO</b>				<b>23</b>
	ATL-BRR-NA-P46	M3, M10		2
	ATL-BRR-NA-P47-	M7, M11		2
	ATL-BRR-NA-P48	M4, M6, M9		3
	ATL-BRR-NA-P49	M5, M11		2
Zona 3:	ATL-BRR-NA-P5	M9	Condición UU - No	2
Barranquill	ATL-BRR-NA-P54	M6, M11	consolidado no	2
a	ATL-BRR-NA-P55	M9	drenado	2
	ATL-BRR-NA-P56	M8		2
	ATL-BRR-NA-P57	M8, M9, M10		3
<b>TOTAL ENSAYOS COMPRESIÓN INCONFINADA</b>				<b>20</b>
<b>TOTAL ENSAYOS RESISTENCIA</b>				<b>43</b>

Se hace énfasis especial en el uso de los datos de caracterización básica, dado que algunos modelos constitutivos como el modelo francés usa los datos producto de la caracterización básica para obtener parámetros de resistencia y deformación y así mismo se tienen una cantidad importante de correlaciones semiempíricas que permiten establecer comportamientos especiales asociados al colapso, la expansividad, la actividad con base en la caracterización básica de los materiales tal como se presenta en la Tabla 5.25. Los datos consolidados de resistencia y deformación para las tres zonas piloto se presentan en el Anexo 5.3

**Tabla 5.25**  
**Ensayos de caracterización básica realizados, algunas correlaciones y norma aplicada**  
**(fuente propia)**

Alcance del ensayo	Ensayo de laboratorio	Propiedades derivadas a evaluar	Norma	Correlaciones propuestas con Propiedades ingenieriles
PROPIEDADES BÁSICAS DEL SUELO	Contenido de agua : humedad	Relación de vacíos $e_0$	ASTM D 2216 , I.N.V.E - 122-13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grado de saturación ( Terzaghi, Peck 1955)</li> <li>• Porosidad , (IAEG, Anon 1979 )</li> <li>• Compacidad relativa de los suelos (Lambe &amp; Whitman)</li> <li>• Relación de vacíos ( IAEG, Anon 1979)</li> <li>• Compresibilidad (compacto y saturado)</li> <li>• Permeabilidad , resistencia al corte</li> <li>• Expansividad de los suelos (Holtz &amp; Gibbs (1957))</li> </ul>
	Peso Unitario y Densidad	peso unitario $\gamma_t$ Peso unitario Total $\gamma_t$ Densidad total $\rho_t$ Peso unitario Seco $\gamma_d$ Densidad seca $\rho_d$ Esfuerzo Vertical total $\sigma_{vo}$	ASTM D-1556 ASTM D-2167 ASTM D-2292 ASTM D-2937	
	Gravedad Específica: Gs		ASTM D-854 , I.N.V.E 128 – 13	
CLASIFICACIÓN TIPO DE SUELO	Límites de Consistencia	Límite líquido: LL % Límite plástico : LP % Índice de plasticidad: IP % Índice de liquidez: IL % Límite de Contracción: LC %	ASTM 4318 , I.N.V.E - 125-13 , I.N.V.E - 126-13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Grado de expansión, potencial de expansión)</li> <li>• Sensitividad de arcillas (Terzaghi &amp; Peck (1973); Skempton et al (1952), Bjerum (1954) ; Rosenqvist (1953), tomado de Mitchell (1976)</li> <li>• Colapso ( Abelev, (1948); Feda ( 1960); Denisov ( 1964); Clevenger (1985); Lin y Wan(1988);</li> <li>Gibs(1961).</li> <li>• Actividad ( Skempton (1953)</li> </ul>
	Límite de Contracción	Línea A Carta de Plasticidad	ASTM D-427 , I.N.V.E 127 – 13	
	Tamizado mecánico	Cu : coeficiente de uniformidad, Cv: coeficiente de curvatura, curva granulométrica, clasificación del suelos	ASTM D-422 , ASTM D 1140 ; I.N.V.E 123 – 13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permeabilidad (relacionado con la compacidad),</li> <li>• Compresibilidad (compacto y saturado),</li> <li>• facilidad de tratamiento en obra</li> </ul>
	Lavado sobre T200	% de finos PT200	I.N.V.E 214– 13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clasificación de actividad coloidal (Skempton (1953)</li> </ul>
	Hidrometría	% de limos, % de arcillas	I.N.V.E 123 – 13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clasificación de dispersividad de suelos</li> </ul>

Igualmente, producto de los ensayos de resistencia y deformación se obtienen variables importantes que se requieren para su aplicación en los modelos constitutivos planteados, tal como se propone en la Tabla 5.26.

Tabla 5.26

Ensayos de resistencia y deformación realizados, correlaciones y norma aplicada (fuente propia)

Alcance del ensayo	Ensayo	Objetivo del Ensayo	Datos obtenidos del ensayo y correlaciones	Norma	Ventajas y desventajas del ensayo
Ensayos de resistencia para suelos o materiales no consolidados	Compresión Inconfinada suelos	Obtener Parámetro Resistencia y deformación Comportamiento esfuerzo deformación para suelos	1. $q_u$ resistencia compresión inconfinada 2. Curva esfuerzo deformación y resistencia al corte no drenada 3. Módulo esfuerzo – Deformación ( módulo de Elasticidad E)	ASTM D 2166 , Norma INV E 152 – 13	No proporciona un valor suficientemente confiable de la resistencia al corte del suelo dado que se pierde la restricción lateral o confinamiento del material y la condición interna del suelo no se puede controlar
	Corte directo ( CD , CU ) suelos		1. Ensayo (U) No consolidado – no drenado: • Parámetros de resistencia: $\Phi = 0$ C= un valor • Círculo de Mohr de esfuerzos: $\tau = c + \sigma n \text{ tang } \Phi$ 2. Ensayo consolidado – No drenado (CU) o ensayo consolidado rápido: • Parámetros de resistencia: $\Phi = (\text{aprox}) 0$ • C= un valor • Círculo de Mohr de esfuerzos: $\tau = c + \sigma n \text{ tang } \Phi$ 3. Ensayo consolidado – drenado (CD) o ensayo consolidado lento: • Parámetros de resistencia: $\Phi = \text{valor verdadero}$ • C= (aprox) 0 • Círculo de Mohr de esfuerzos: $\tau = c + \sigma n \text{ tang } \Phi$ El ensayo se puede adelantar para muestras inalteradas o definido como condición pico y para muestras alteradas o conocida como condición residual	ASTM D 3080 , INV E 154	El ensayo presenta varias ventajas y desventajas tales como: 1. El área de la muestra cambia a medida que el ensayo progresa. 2. La superficie de falla real no es un plano y no se tiene una distribución uniforme del esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de falla 3. No es posible determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson 4. El comportamiento de la presión de poros durante el corte no puede ser evaluado 5. Los parámetros de resistencia y deformación obtenidos por el método de corte directo son casi tan confiables como los valores triaxiales
	Triaxial (CD , CU , UU)		1. Ensayo (UU) No consolidado – no drenado: • Parámetros de resistencia: $\Phi = 0$ c= un valor • Círculo de Mohr de esfuerzos: $\tau = c + \sigma n \text{ tang } \Phi$ • Módulo de Young y relación de Poisson 2. Ensayo consolidado – No drenado (CU) o ensayo consolidado rápido: • Parámetros de resistencia: $\Phi = (\text{aprox}) 0$ • c = un valor • Círculo de Mohr de esfuerzos: $\tau = c + \sigma n \text{ tang } \Phi$ • Módulo de Young y relación de Poisson 3. Ensayo consolidado – drenado (CD) o ensayo consolidado lento: • Parámetros de resistencia: $\Phi = \text{valor verdadero}$ • c= (aprox) 0 • Círculo de Mohr de esfuerzos: $\tau = c + \sigma n \text{ tang } \Phi$ • Módulo de Young y relación de Poisson	ASTM D 2850 (UU) ASTM D 4767 (CU) ASTM D 7181 (CD)	El ensayo presenta las siguientes ventajas y desventajas: • Este ensayo permite el establecimiento de cualquier estado en el fluido de los poros, desde un estado negativo ( Vacío) hasta un estado completamente saturado. • Se puede evaluar el comportamiento de la presión de poros durante el ensayo • En general los ensayos sobre materiales finos cohesivos requieren mayor cantidad de tiempo y necesitan un control muy detallado, generando costos importantes el desarrollo del ensayo • Es un ensayo que presenta mayores dificultades en su ejecución e interpretación de resultados
Ensayos de deformación para materiales no consolidados: suelos	consolidación Unidimensional	Obtener el nivel del asentamiento o deformación vertical esperada en el material ensayado	$\sigma_p'$ : esfuerzo preconsolidación RSC : Relación de sobre consolidación Cc : Coeficiente de compresión Cce: Índice de compresión modificado Cr : Coeficiente de recompresión Cre : Índice de recompresión modificado C $\alpha$ : coeficiente de consolidación primaria C $\alpha$ e : índice de compresión secundaria modificado cv : Coeficiente de consolidación vertical k: conductividad hidráulica t50 = Tiempo para el cual ocurre el 50% de consolidación t90 = Tiempo para el cual ocurre el 90% de consolidación	ASTM D 2435 , I.N.V.E 151-13	• Calidad de la muestra mediante RCS (Lacasse et al., 1985) • Porosidad , (IAEG, Anon 1979) • Compacidad relativa de los suelos (Lambe & Whitman) • Relación de vacíos ( IAEG, Anon 1979) • Compresibilidad (compacto y saturado) • Permeabilidad , resistencia al corte • Expansividad de los suelos (Holtz & Gibbs (1957)) • (Grado de expansión, potencial de expansión) • Sensitividad de arcillas (Terzaghi & Peck (1973); Skempton et al (1952), Bjerum (1954) ; Rosenqvist (1953), tomado de Mitchell (1976)

### **5.6.1 Ensayos de caracterización básica efectuados sobre muestras producto de exploración directa -2019- 2021**

Para la caracterización básica, se realizaron ensayos convencionales de granulometría por tamizado, hidrometría, límites de Atterberg (incluyendo en algunos casos el límite de contracción), Gravedad específica – Gs, peso unitario, usando como sistema de clasificación el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - USCS (Unified Soil Classification System), el cual se basa en la clasificación modificada de Casagrande; sin embargo y con el objeto de efectuar un análisis más profundo a nivel de la microfábrica de los suelos se efectuaron análisis mineralógicos que se describen más adelante.

En las tablas 5.27 y 5.28 se presentan los resultados consolidados de los ensayos de caracterización básica para el municipio de Tabio en Sabana de Bogotá y en las tablas 5.29 y 5.30 los resultados consolidados de caracterización básica para los municipios de Montenegro y Tebaida en el departamento de Quindío.



Tabla 5.27

Consolidados resultados de laboratorio caracterización básica por nivel litológico S-2 Sabana de Bogotá

Sondeo	COORDENADAS		Profundidad	Promedio profundidad	Humedad	Peso específico	Hidrometria		Limite de contraccion	Limite liquido	Limite plastico	Indice plasticidad	Tipo de suelo
	NORTE	ESTE					mts	mts					
S2-M1	4°38'21.95"	74°5'29.49"	0,0 / 0,60	0,3	73,62					62,75	56,72	6,03	MH
S2-M2	4°38'21.95"	74°5'29.49"	0,60 / 1,20	0,9	77,39	2,73							SW
S2-M3	4°38'21.95"	74°5'29.49"	1,20 / 2,50	1,85	30,72	2,56	51,08	49	25,53	28,67	16,68	9,99	CL
S2-M4	4°38'21.95"	74°5'29.49"	2,50/4,0	3,25	45,92	2,63	42,21	58,2	82,62	57,63	41,45	16,19	MH
S2-M5	4°38'21.95"	74°5'29.49"	4,00 / 5,50	4,75	32,71	2,62	40,64	60	22,48	43,95	32,49	11,46	ML
S2-M6	4°38'21.95"	74°5'29.49"	5,50 / 7,0	6,25	38,14	2,57	51,93	47,9	18,58	34,3	23,75	10,55	CL-ML
S2-M7	4°38'21.95"	74°5'29.49"	7,0 / 8,50	7,75	23,84	2,72	41,34	58,6	16,39	37,87	25,38	12,5	CL-ML
S2-M8	4°38'21.95"	74°5'29.49"	8,50 / 10,0	9,25	19,91	2,7	59,37	41	16,32	33,67	21,91	11,76	ML
S2-M9	4°38'21.95"	74°5'29.49"	10,00 / 11,50	11,25	40,7	2,79	42,97	40	27,33	59,13	43,54	15,59	MH
S2-M10	4°38'21.95"	74°5'29.49"	11,50 / 13,00	12,25	46,3	2,66	28,92	48,4	21,98	65,57	45,74	19,83	MH
S2-M11	4°38'21.95"	74°5'29.49"	13,00 / 15,00	14	33,05	2,59	37,49	33	16,15	42,14	31,8	10,34	ML

Tabla 5.28

Consolidados resultados de laboratorio caracterización básica por nivel litológico TAB-1 Sabana de Bogotá

Sondeo	Coordenadas		Profundidad mts	Humedad Natural	Peso especifico	Limite liquido	Limite plastico	Indice plasticidad	Hidrometria		Limite de contraccion	Peso unitario γt	% Pasa No. 200	Tipo de suelo
	Norte	Este							%limos	%arcillas				
TAB 1 - M1	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	0,0/0,50	56,24	2,36	61,54	52,79	8,75	37,25	3,20	36,64	1,34	95,87	MH
TAB 1 - M2	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	0,50/1,0	61,54	2,48	50,73	42,33	8,4	31,66	3,00	35,52	1,57	94,77	MH
TAB 1 - M3	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	1,0/1,50	30,09	2,59	21,38	14,48	6,9	23,75	18,30	11,99	1,74	78,15	CL
TAB 1 - M4	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	2,60/3,10	28,82	2,68	47,75	28,01	19,74	47,67	34,80	16,64	2,03	99,97	ML
TAB 1 - M5	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	3,10/3,60	32,99	2,61	48,96	25,99	22,97	62,56	31,30	20,60	1,89	99,93	CL
TAB 1 - M6	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	4,10/4,70	29,36	2,61	51,31	26,02	25,29	52,51	31,30	17,74	2,00	99,97	CH
TAB 1 - M7	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	4,70/5,20	32,21	2,53	49,42	34,46	14,96	49,39	31,90	18,61	1,99	99,88	ML
TAB 1 - M8	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	7,20/7,80	71,06	2,56	32,13	20,85	11,28	40,09	33,40	12,71	1,67	93,35	CL
TAB 1 - M9	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	7,80/8,50	38,59	2,55	52,32	33,55	18,77	46,20	50,60	15,92	1,85	99,89	MH
TAB 1 - M10	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	11,0/11,60	19,48	2,64	24,83	18,6	6,23	33,45	14,40	23,78	2,23	73,90	CL
TAB 1 - M11	4°54'18.15"	74° 5'20.32"	14,0/14,70	24,03	2,63	22,44	17,95	4,49	35,27	7,90	14,95	2,15	68,64	CL

Tabla 5.29

Consolidados resultados caracterización básica por nivel litológico MN-1, Montenegro- Quindío

Sondeo	COORDENADAS		Profundidad	promedio profundidad	HUMEDAD NATURAL	Peso específico Gs	Limite liquido %	Limite plastico %	Indice plasticidad %	Hidrometria		Limite de contraccion	Peso unitario	% Pasa No. 200	Tipo de suelo ( USC)
	NORTE	ESTE	mts	mts						%limos	%arcillas		γt		
MN1-M1	4°29'14.00"	75°48'34,00"	0,,0/0,60	0,3	31,10	2,67	NP	NP	NP	10,69	2,00	NA	1,59	33,03	SM
MN1-M2	4°29'14.00"	75°48'34,00"	0,60/1,20	0,9	24,92	2,69	32,09	24,97	7,12	14,18	4,90	24,03	1,84	49,86	ML
MN1-M3	4°29'14.00"	75°48'34,00"	2,60/3,20	2,8	32,26	2,69	33,13	26,36	6,77	22,77	7,00	23,60	1,96	59,35	ML
MN1-M4	4°29'14.00"	75°48'34,00"	4,40/5,0	4,7	60,31	2,73	NP	NP	NP	18,56	3,60	35,90	1,56	61,60	SM
MN1-M5	4°29'14.00"	75°48'34,00"	6,20/6,80	6,5	48,37	2,69	NP	NP	NP	11,02	1,50	24,14	1,67	38,74	SM
MN1-M6	4°29'14.00"	75°48'34,00"	9,0/9,60	9,3	51,07	2,74	35,28	32,06	5,22	26,38	8,60	22,35	1,92	73,40	ML
MN1-M7	4°29'14.00"	75°48'34,00"	11,40/12,0	11,7	61,02	2,76	76,72	48,03	28,69	38,85	17,20	22,19	1,69	97,94	MH
MN1-M8	4°29'14.00"	75°48'34,00"	13,40/14,0	13,5	63,26	2,75	90,59	58,80	31,79	39,47	17,40	19,06	1,71	99,18	MH

Tabla 5.30

Consolidados resultados caracterización básica por nivel litológico TEB-3, Tebaida- Quindío

Sondeo	COORDENADAS		Profundidad mts	promedio profundidad mts	% Humedad	Peso especifico	Lavado t #200	Limite liquido	Limite plastico		Hidrometria %limos %arcillas	%	Limite de contracción	Peso unitario total	Tipo de suelo
	NORTE	ESTE							%	%					
TB3-M1	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	0,0/0,60	0,30	25,65	2,62	48,79	31,95	25,83	6,11	10,10	6,90	24,25	1,85	ML
TB3-M2	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	0,60/1,20	0,90	21,23	2,72	41,74	25,89	21,34	4,54	10,11	7,40	20,65	1,93	CL-ML
TB3-M3	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	1,20/1,80	1,50	62,14	2,63	84,09	51,30	40,50	10,79	17,44	11,80	36,13	1,48	MH
TB3-M4	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	1,80/2,40	2,10	60,74	2,72	74,66	41,98	35,86	6,12	21,02	10,30	33,47	1,62	ML
TB3-M5	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	3,40/4,0	3,70	56,76	2,66	70,40	44,26	35,49	8,76	17,32	9,80	33,97	1,53	ML
TB3-M6	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	5,20/5,80	5,50	42,34	2,69	54,36				14,40	6,40	NA	1,71	SM
TB3-M7	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	7,0/7,60	7,30	79,69	2,72	92,96	71,20	59,71	11,49	31,72	14,60	43,24	1,47	MH
TB3-M8	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	10,40/11,0	10,70	51,96	2,70	98,46	87,79	50,34	37,45	39,61	19,40	20,34	1,62	MH
TB3-M9	4°26'09,2"	75°50'24,1 "	13,40/14,0	13,70	52,95									1,72	

## 5.6.2 Variabilidad propiedades índice por zona piloto

Se efectuó un análisis de la variabilidad de las propiedades índices por zona piloto en primer lugar para la información secundaria, luego para la información producto de campo y posteriormente para la información unificada. Enseguida se presentan los resultados por zona piloto.

### 5.6.2.1 Zona piloto 1: Sabana de Bogotá – municipio de Tabio

- **Límites de consistencia, peso unitario, Gravedad específica, Índice de consistencia ( $I_c$ )**

La Figura 5.25 presenta las gráficas de variación de los límites de consistencia, el peso unitario, la gravedad específica (GS) y el índice de consistencia con la profundidad, para la información secundaria seleccionada y primaria de campo; el índice de consistencia viene dado por la expresión:

$$I_c = \frac{(LL - w_p)}{IP} \quad (5.1)$$

En las Tablas 5.31 a 5.33 se presentan los resultados del análisis estadístico para las propiedades índice producto de información secundaria, primaria y consolidada.

Tabla 5.31

Valores de las propiedades índice promedio municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información secundaria

PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (kN/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	Indice de Consistencia I <sub>c</sub>
A	0,00 - 5,2	Media $\mu$	37,85	69,11	28,91	40,19	16,68	2,77	0,70
		Desviacion estandar $\sigma$	20,30	31,20	9,15	23,22	1,64	0,06	0,24
		COV	0,54	0,45	0,32	0,58	0,10	0,02	0,34
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	32,17	34,23	19,06	15,16	17,78	2,78	0,48
		Desviacion estandar $\sigma$	13,72	4,16	6,49	4,11	4,70	0,00	0,28
		COV	0,43	0,12	0,34	0,27	0,26	0,00	0,59

Tabla 5.32

Valores de las propiedades índice promedio municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información primaria

PROPIEDADES INDICE										
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCION	PESO UNITARIO TOTAL (kN/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	Indice de Consistencia I <sub>c</sub>
A	0,00 - 5,20	Media $\mu$	44,30	47,64	33,77	13,70	28,84	17,69	2,58	0,81
		Desviacion estandar $\sigma$	18,23	12,70	13,57	6,64	20,49	2,60	0,10	0,15
		COV	0,41	0,27	0,40	0,48	0,71	0,15	0,04	0,19
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	35,51	40,44	28,31	12,13	18,41	19,37	2,64	0,86
		Desviacion estandar $\sigma$	15,63	14,34	10,02	4,89	4,54	2,56	0,08	0,10
		COV	0,44	0,35	0,35	0,40	0,25	0,13	0,03	0,12

Tabla 5.33

Valores de las propiedades índice promedio municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información primaria y secundaria

PROPIEDADES INDICE										
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCIÓN	PESO UNITARIO TOTAL (kN/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	Índice de Consistencia I <sub>c</sub>
A	0,00 - 5,20	Media $\mu$	38,96	61,95	30,53	31,36	28,84	16,89	2,70	0,80
		Desviación estandar $\sigma$	19,98	28,19	10,86	22,99	20,49	1,87	0,12	0,34
		COV	0,51	0,46	0,36	0,73	0,71	0,11	0,04	0,43
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	33,41	38,37	25,23	13,14	18,41	18,69	2,66	0,80
		Desviación estandar $\sigma$	14,25	12,10	9,84	4,73	4,54	3,37	0,09	0,33
		COV	0,43	0,32	0,39	0,36	0,25	0,18	0,03	0,41

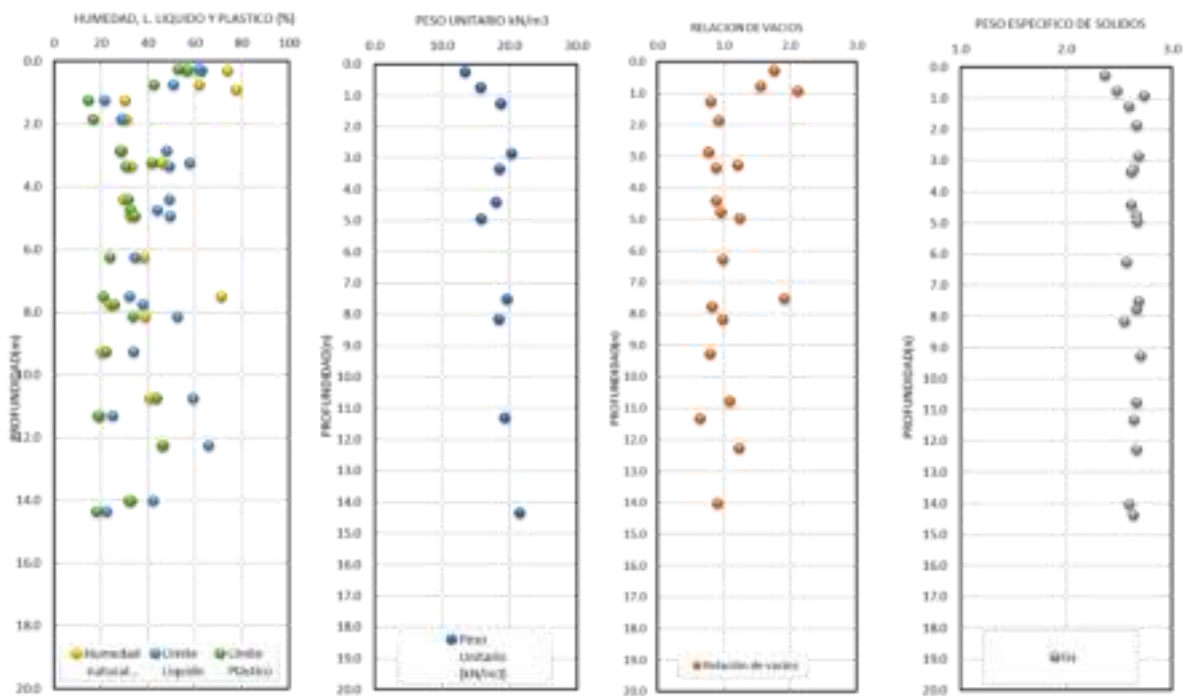


Figura 5.25 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipio de Tabio con base en información secundaria- Sabana de Bogotá

Del análisis de datos de información primaria y secundaria conjuntos que se presentan en la tabla 6.33 se observa que en el nivel litológico A se tiene una media en el valor del LL de 61.95 e índices de plasticidad con una media de 31.36%; en la zona litológica B, se tiene una media en el valor del LL de 38.37% y un IP medio de 13.14%. Aunque los pesos unitarios presentan una

variabilidad media, entre 16.89 kn/m<sup>3</sup> en el nivel litológico A, hasta 18.69 kn/m<sup>3</sup> en el nivel litológico B; en cuanto a los valores de gravedad específica varían entre 2.7 en superficie para el nivel litológico A y 2.66 para el nivel litológico B. El valor medio del Ic en el nivel litológica A y B es de 0.80. Estos resultados muestran un suelo que se presenta mayormente consolidado a lo largo del perfil, como deberá obtenerse de los valores calculados de los ensayos de laboratorio con un suelo que se presenta normalmente consolidado a ligeramente sobreconsolidado, disminuyendo la consolidación en profundidad.

Sin embargo, al analizar por separado la variabilidad del Ic para la información producto de información secundaria y de análisis de campo se presenta menor dispersión que la que se obtiene del análisis conjunto de la información, teniendo valores de este índice menores y decreciendo en profundidad para la información secundaria entre 0.7 y 0.48, mientras que para la información primaria tomada en campo entre 2019 y 2021 se tienen valores entre 0.81 y 0.86 aumentando en profundidad. Una de las razones puede estar asociada a la época del año en la cual se efectuó la toma de muestras que modifica sustancialmente los valores de la humedad.

#### **5.6.2.2 Zona piloto 2: Quindío- municipios Montenegro y Tebaida**

- **Límites de consistencia, peso unitario, Gravedad específica, Índice de consistencia (Ic)**

La Figura 5.26 presenta las gráficas de variación de los límites de consistencia, el peso unitario, la gravedad específica (GS) y el índice de consistencia con la profundidad, para la información secundaria y primaria de campo y consolidada; en las Tablas 5.34 a 5.36 se presentan los resultados del análisis estadístico para las propiedades índice producto de información secundaria, primaria y consolidada.



Tabla 5.34

Valores de las propiedades índice promedio municipios Montenegro, Armenia y Tebaida-Quindio- Información secundaria

PROPIEDADES INDICE										
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCIÓN	PESO UNITARIO TOTAL (kN/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	Índice de Consistencia I <sub>c</sub>
A	0,00 - 5,2	Media $\mu$	44,68	54,32	39,99	14,33	N.A.	15,34	2,63	0,45
		Desviacion estandar $\sigma$	17,75	17,45	12,49	7,62	N.A.	1,53	0,12	0,26
		COV	0,40	0,32	0,31	0,53	N.A.	0,10	0,05	0,58
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	55,84	68,81	48,93	19,90	N.A.	15,47	2,72	0,76
		Desviacion estandar $\sigma$	24,51	26,27	16,56	13,02	N.A.	1,73	0,14	0,25
		COV	0,44	0,38	0,34	0,65	N.A.	0,11	0,05	0,33

Tabla 5.35

Valores de las propiedades índice promedio municipios Montenegro, Armenia y Tebaida-Quindio- Información primaria de campo

PROPIEDADES INDICE										
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCIÓN	PESO UNITARIO TOTAL (kN/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	Índice de Consistencia I <sub>c</sub>
A	0,00 - 5,2	Media $\mu$	42,01	36,84	29,32	7,52	27,62	16,72	2,67	0,86
		Desviacion estandar $\sigma$	16,76	7,62	6,13	2,07	6,08	1,61	0,05	0,41
		COV	0,40	0,21	0,21	0,28	0,22	0,10	0,02	0,48
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	56,71	70,87	49,38	21,74	25,44	16,57	2,71	0,79
		Desviacion estandar $\sigma$	9,48	21,81	10,89	12,67	7,29	0,98	0,03	0,20
		COV	0,17	0,31	0,22	0,58	0,29	0,06	0,01	0,25

Tabla 5.36

Valores de las propiedades índice promedio municipios Montenegro, Armenia y Tebaida-Quindio- Información secundaria y primaria de campo

PROPIEDADES INDICE										
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCIÓN	PESO UNITARIO TOTAL (kN/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	Índice de Consistencia I <sub>c</sub>
A	0,00 - 5,2	Media $\mu$	44,47	51,14	38,05	13,09	27,62	15,66	2,64	0,61
		Desviación estandar $\sigma$	17,64	17,44	12,27	7,42	6,08	1,64	0,10	0,41
		COV	0,40	0,34	0,32	0,57	0,22	0,10	0,04	0,67
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	55,95	69,19	49,01	20,23	25,44	15,79	2,72	0,80
		Desviación estandar $\sigma$	23,14	25,29	15,57	12,83	7,29	1,62	0,11	0,28
		COV	0,41	0,37	0,32	0,63	0,29	0,10	0,04	0,36

Del análisis de datos de información primaria y secundaria conjuntos que se presentan en la tabla 5.36 se observa que en el nivel litológico A se tiene una media en el valor del LL de 51.14 e índices de plasticidad con una media de 13.09%; en la zona litológica B, se tiene una media en el valor del LL de 69.19% y un IP medio de 20.13%. Aunque los pesos unitarios presentan una variabilidad baja, entre 15.66 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico A, hasta 15.79 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico B; en cuanto a los valores de gravedad específica varían entre 2.74 en superficie para el nivel litológico A y 2.72 para el nivel litológico B. El valor medio del I<sub>c</sub> en el nivel litológica A es de 0.61 y para el nivel B el valor medio del I<sub>c</sub> es de 0.80. Estos resultados muestran un suelo que se presenta mayormente consolidado a lo largo del perfil, como deberá obtenerse de los valores calculados de los ensayos de laboratorio con un suelo con un medio a alto nivel de sobreconsolidación, aumentando en profundidad.

Al analizar por separado la variabilidad del I<sub>c</sub> para la información producto de información secundaria y de análisis de campo se presenta menor dispersión que la que se obtiene del análisis conjunto de la información, teniendo valores de este índice de consistencia que aumentan en profundidad para la información secundaria, mientras que para la información primaria tomada en campo entre 2019 y 2021 se tienen valores de este índice constantes en superficie y en profundidad. Una de las razones puede estar asociada a la época del año en la cual se efectuó la toma de muestras que modifica sustancialmente los valores de la humedad.

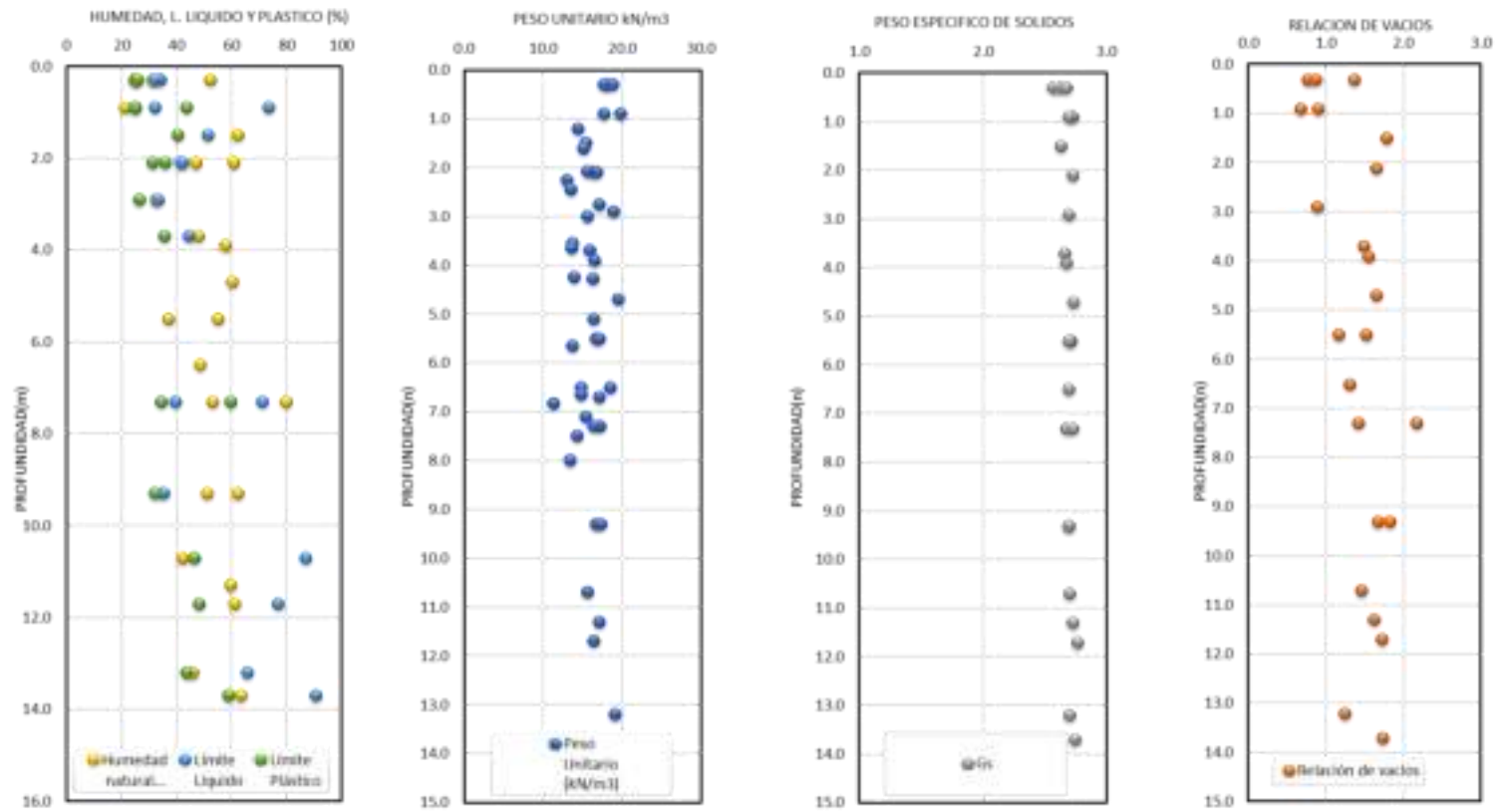


Figura 5.26 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipios Montenegro, Tebaida y Armenia información primaria-Quindío

### 5.6.2.3 Zona piloto 3: municipios de Barranquilla- Sector Loma Roja

- Límites de consistencia, peso unitario, Gravedad específica, Índice de consistencia (Ic)

La Figura 5.27 presenta las gráficas de variación de los límites de consistencia, el peso unitario, la gravedad específica (GS) y el índice de consistencia con la profundidad, para la información secundaria seleccionada, en la Tabla 5.37 se presentan los resultados del análisis estadístico para las propiedades índice producto de información secundaria.

*Tabla 5.37  
Valores de las propiedades índice promedio municipio Barranquilla- Sector Loma Roja  
Información secundaria*

PROPIEDADES INDICE										
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCIÓN	PESO UNITARIO TOTAL (kN/m <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	Índice de Consistencia I <sub>c</sub>
A	0,00 - 5,20	Media $\mu$	38,69	68,16	26,55	41,58	N.A.	18,58	2,79	0,66
		Desviacion estandar $\sigma$	11,16	17,82	6,69	13,47	N.A.	2,29	0,52	0,16
		COV	0,29	0,26	0,25	0,32	N.A.	0,12	0,19	0,24
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	27,12	61,88	30,85	31,03	N.A.	18,69	2,84	0,88
		Desviacion estandar $\sigma$	9,76	15,75	6,65	13,07	N.A.	1,77	0,52	0,13
		COV	0,36	0,25	0,22	0,42	N.A.	0,09	0,18	0,14

Del análisis de datos de información secundaria que se presentan en la tabla 5.37 se observa que en el nivel litológico A se tiene una media en el valor del LL de 68.16 e índice de plasticidad con una media de 41.58%; en la zona litológica B, se tiene una media en el valor del LL de 61.88% y un IP medio de 31.03%. Aunque los pesos unitarios presentan una variabilidad baja, entre 18.58 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico A, hasta 18.69 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico B; en cuanto a los valores de gravedad específica varían entre 2.79 en superficie para el nivel litológico A y 2.84 para el nivel litológico B. El valor medio del I<sub>c</sub> en el nivel litológica A es de 0.66 y para el nivel B el valor medio del I<sub>c</sub> es de 0.78. Estos resultados muestran un suelo que se presenta mayormente consolidado a lo largo del perfil aumentando en profundidad, como deberá obtenerse de los valores calculados de los ensayos de laboratorio con un suelo con un nivel de sobreconsolidación de medio a alto aumentando en profundidad.

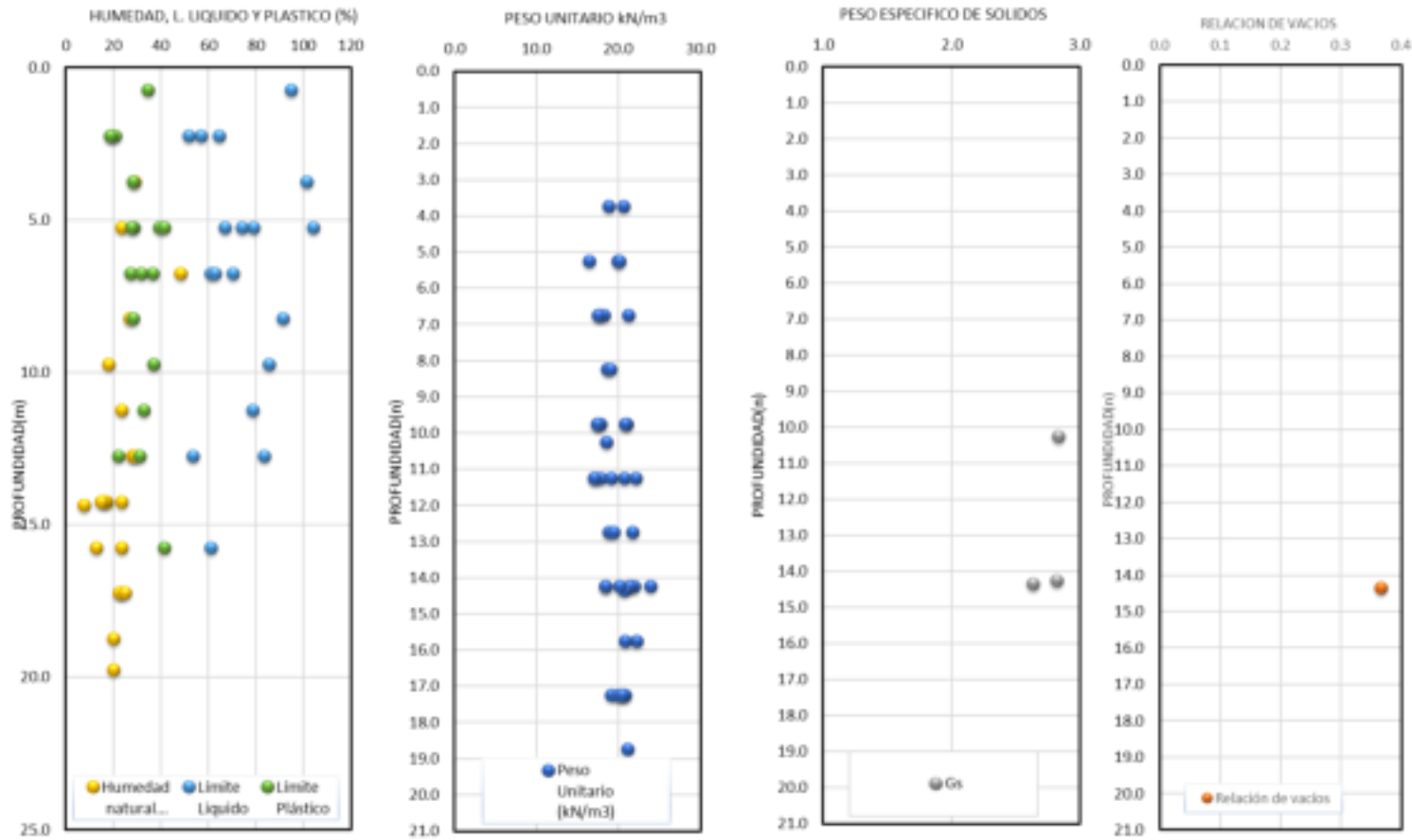


Figura 5.27 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipio de Barranquilla, sector Loma Roja

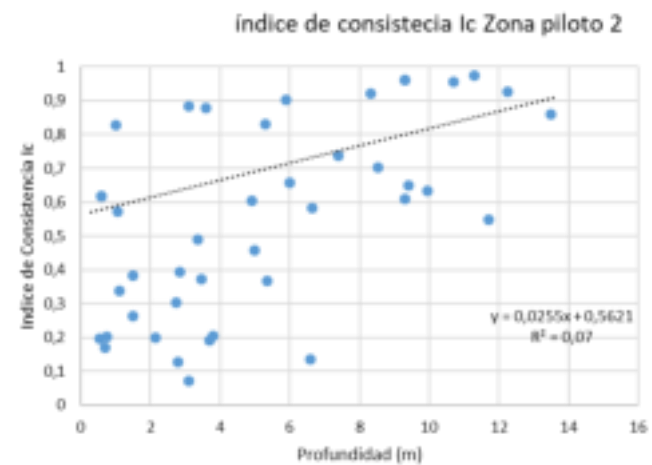
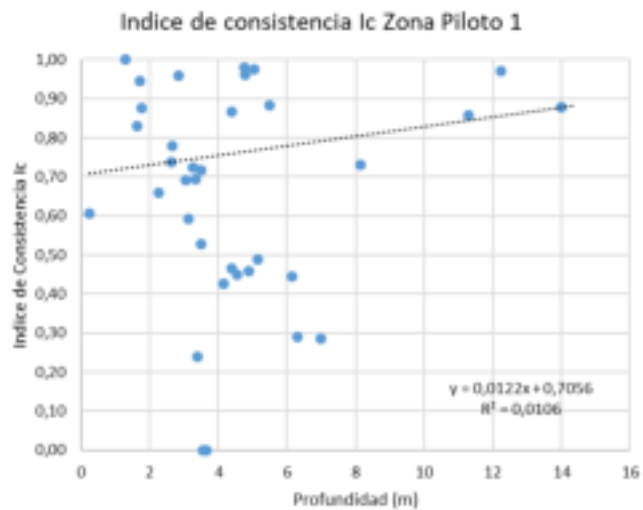


Figura 5.28 Variación de los índices de consistencia con la profundidad municipio de Barranquilla, sector Loma Roja

En la figura 5.28 se presenta la variación del índice de consistencia  $I_c$  reacionado a la profundidad para cada una de las zonas piloto.

En la Tabla 5.38 se presentan los valores medios del índice de consistencia obtenidos por nivel litológico para las tres zonas piloto de sus propiedades índice con fines comparativos. Es importante observar como en los dos niveles litológicos el  $I_c$  es mayor de 0.4 y se acerca a 1, lo cual indica que los suelos ya han alcanzado en algunos casos la condición final de consolidación; esto especialmente en el nivel litológico B (mayor profundidad).

*Tabla 5.38*  
*Valores medios del índice de consistencia tres zonas piloto (fuente propia)*

índice de Consistencia $I_c$						
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	Zona 1- Sabana-Tablo	Zona 2: Quindio-Montenero,	Zona 3: Barranquilla-Sector Loma Roja	OBSERVACIONES
A	0,00 - 5,20 m	Media $\mu$	0,80	0,61	0,66	Los valores del índice de consistencia se encuentran entre 0,61 y cercanos a 1, es decir los suelos en general son plásticos con consistencia media
		Desviación estandar $\sigma$	0,34	0,41	0,16	
		COV	0,43	0,67	0,24	
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	0,80	0,80	0,88	Los valores del índice de consistencia se encuentran entre 0,80 y 0,88, es decir los suelos en general son materiales con consistencia entre media y dura y aumentando en profundidad en las tres zonas
		Desviación estandar $\sigma$	0,33	0,28	0,13	
		COV	0,41	0,36	0,14	

### 5.6.3 Ensayo de Compresibilidad y deformabilidad efectuados sobre muestras producto de exploración directa -2019- 2021

Para estimar la deformabilidad y compresibilidad se han realizado varios ensayos mediante el edómetro siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM D2435-04 preparando las muestras de los cuatro sondeos en las condiciones de humedad y densidad establecidas en la norma, en especímenes de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura. En las figuras 5.29 y 5.30 respectivamente, se puede observar el equipo del ensayo edométrico utilizado y algunas de las muestras ensayadas para dos sondeos, el sondeo TAB-1 de Sabana de Bogotá y el sondeo TEB-3 de Quindío; los ensayos para los sondeos S-2 y MN-1 se realizaron en el laboratorio de Geotecnia del SGC. Estos análisis fueron complementados con los resultados de caracterización física y mediante

la aplicación de relaciones semiempíricas para la estimación del potencial de expansión, colapso y sensibilidad que pudieran ser comparables con los datos obtenidos a partir de la información secundaria. Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de geotécnica del Servicio Geológico Colombiano y en el Laboratorio de la Universidad Militar Nueva Granada en Cajicá. No se realizaron mediciones directas del potencial de expansión en muestras inalteradas.



*Figura 5.29 Equipos usado para el ensayo edométrico (fuente propia)*



*Figura 5.30 Muestras recuperadas en el municipio de Tabio Cundinamarca (fuente propia)*



El proceso de compresibilidad se determinó en muestras saturadas que fueron sometidas a unos incrementos de esfuerzos totales que se aplicaron en uno a tres ciclos de carga y descarga entre 4 a 6 escalones de carga que son precedidos con un proceso de descarga de entre 2-3 escalones; las muestras tomadas en el año 2019 solo tuvieron un ciclo de carga y descarga y las muestras tomadas en el año 2021 y 2022 dos ciclos de carga y descarga; cada escalón de carga tuvo una duración de un mínimo de 4 horas, verificando que existiera deformación en  $t_{50}$  y  $t_{90}$  que pudiera garantizar la máxima disipación del exceso de presión de poros para cada carga aplicada; debido a esta situación y cuando se pudieron desarrollar ensayos con mayor cantidad de tiempo se aumentaron los ciclos de carga y descarga con el fin de afinar los valores obtenidos para Cr. Todas las muestras se ensayaron siguiendo las recomendaciones de la Norma ASTM D2435-04 con escalones de carga cada vez mayores como se aprecia en las tabla 5.39.

*Tabla 5.39*  
*Escalones de carga y descarga ensayo edométrico*

<b>Ensayo Edométrico</b>	
<b>Escalones de carga (kPa)</b>	<b>Escalones de descarga (kPa)</b>
100 gr (precarga)	
250 gr	
500 gr	
1 Kg	
2 Kg	
4 Kg	4 kg
	2 kg
6 kg	
8 kg	
16 kg	
	16 kg
	8 kg
	4 kg
	Descarga a 0 en el brazo

A partir de los ensayos de consolidación unidimensional se han obtenido las curvas de consolidación y de compresibilidad edométrica. De estas curvas se han estimado los siguientes parámetros:

- Curvas de consolidación: coeficiente de consolidación primaria vertical ( $C_v$ ) que permite estimar la velocidad de disipación de las presiones intersticiales o la velocidad de asentamiento obtenido mediante el método de Casagrande (1937)
- Curvas de compresibilidad edométrica: índice de poros inicial ( $e_0$ ) cálculo del índice de compresión ( $C_c$ ), índice de hinchamiento ( $C_s$ ,  $C_r$ ), el módulo edométrico ( $E_m$ ) y el coeficiente de permeabilidad ( $k$ ).

Para el cálculo de los coeficientes se usó el método de Casagrande (1937), el cual es un método gráfico que consiste, básicamente, en determinar sobre la curva de consolidación el tiempo en el cual se desarrolla el 50% de la consolidación primaria  $t_{50}$ . Primero se determina la deformación teórica correspondiente al 0% de la consolidación, al inicio del ensayo, y la deformación correspondiente al 100% de la consolidación primaria. Ésta se traza extendiendo la recta tangente a la parábola en el punto de inflexión y la recta tangente a los últimos puntos de la curva de consolidación. Ambas rectas se intersectan en un punto A cuya ordenada representa la deformación correspondiente al 100% de la consolidación primaria. Una vez determinado el 0% y el 100% de la consolidación se calcula la mitad de dicha distancia, que es la deformación correspondiente al 50% de la consolidación. Teniendo este valor como ordenada se obtiene el punto B perteneciente a la curva, cuya abscisa representa el tiempo en que se produce el 50% de la consolidación primaria ( $t_{50}$ ). Con  $t_{50}$  y  $T_{50}$  (este último obtenido de la curva teórica correspondiente a las condiciones de drenado utilizadas durante el ensayo) se puede determinar el coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) (figura 5.31) a partir de la ecuación 5.2:

$$C_v = \frac{T_{50} H^2}{t_{50}} \quad (5.2)$$

La relación de vacíos se puede obtener por cada incremento de carga en la siguiente forma; donde  $\Delta H$  es la variación del espesor de la muestra de suelo y  $H_0$  el espesor inicial de la muestra de suelo.

$$e = e_0 - \left( \frac{\Delta H}{H_0} \right) (1 + e_0) \quad (5.3)$$

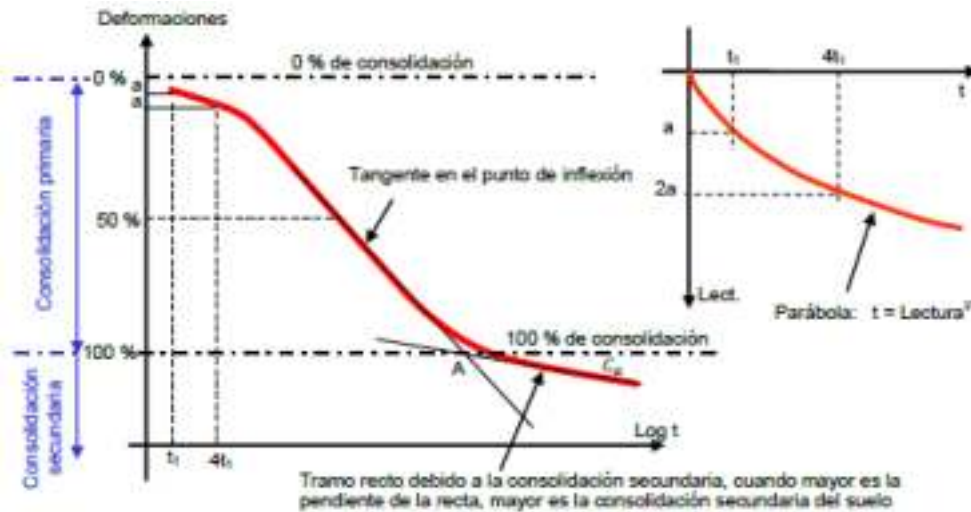


Figura 5.31 Esquema de curva de consolidación procedente de un ensayo de consolidación Unidimensional (tomado de Meaza Tsige Aga, Svetlana Melentijevic, 2.19)

Al final de cada incremento o decremento de carga se puede obtener el estado de deformación del suelo a partir de la relación de vacíos, la deformación vertical relativa  $\epsilon_v$  y el esfuerzo efectivo vertical  $\sigma'_v$ , para obtener la gráfica de relación de vacíos, esfuerzo efectivo vertical, de donde se obtienen los valores del índice de compresión ( $C_c$ ) y el índice de hinchamiento ( $C_s$ ). La relación entre el incremento de carga vertical efectiva y la deformación alcanzada en cada escalón de carga de la rama inicial permite conocer la compresibilidad del suelo expresada a través del parámetro del módulo edométrico ( $E_m$ ) definido por la ecuación 5.4:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta e} (1 + e_0) \quad (5.4)$$

#### 5.6.4 Ensayos de Resistencia efectuados sobre muestras producto de exploración directa -2019-2021

Para el análisis de la resistencia de los materiales se usaron diferentes tipos de ensayos que se resumen enseguida:

1. Ensayo de compresión inconfiada en suelos: ensayo de resistencia a la compresión en condiciones no consolidada no drenada - UU. Permite conocer los esfuerzos totales en materiales arcillosos en condición no consolidada no drenada. Para la realización de este ensayo

se usó una prensa de compresión inconfiada marca PINZUAR COMPRESIÓN INCONFINADA - PSD-10S, aplicando fuerzas hasta 5 kN o 50 kN, según el rango de trabajo seleccionado, a velocidad programable. Se efectuaron ensayos de compresión inconfiada a lo largo de todo el perfil de muestras recuperadas con el fin de conocer el comportamiento de esta variable en profundidad.

2. Ensayo de resistencia al corte en condición consolidado – drenado (CD), con el fin de obtener los esfuerzos efectivos. Para la ejecución de este ensayo se usaron equipos de corte directo servoasistido marca CONTROLS: este equipo de referencia 27-WF21E80 es un equipo automático, con actuación servo asistida para el desarrollo de ensayos de corte directo. El ensayo se realiza en condiciones drenadas con el fin de obtener la resistencia al corte en términos de esfuerzos efectivos. El ensayo se realizó bajo el estándar de la norma ASTM-D 3080. Se realizó a una velocidad de 0.008 mm /min con el fin de alcanzar las condiciones requeridas para suelos predominantemente arcillosos. Las muestras se consolidan con un tiempo mínimo de 24 horas que garantiza la consolidación del espécimen para iniciar la etapa de corte. Posterior a la finalización de la etapa de corte y obtenido el parámetro de resistencia al corte pico, se procede a efectuar el ensayo de resistencia al corte residual a partir de continuar la falla de la muestra aplicando sucesivos ciclos de corte (5) a velocidades superiores entre 1.0 a 1.5 mm/min; el último ciclo de corte se realiza a la velocidad de corte realizada para el ensayo de resistencia pico, es decir 0.008 mm/min. En la fotografía de la Figura 5.32 se presentan los equipos usados para la realización del ensayo.
  
3. Ensayo de resistencia al corte en condición consolidado no drenado en equipo triaxial estático marca GDS Instruments: Este equipo se compone de diferentes elementos necesarios para la realización del ensayo; entre ellos, controladores de presión y volumen, tarjetas de adquisición de datos, sensores de carga, deformación y presión, marco de carga de hasta 50 kN y tres cámaras triaxiales. Todos los elementos se controlan mediante un computador que hace la recolección de los diferentes sensores para que después puedan ser procesados. En las fotografías de las Figuras 5.33 y 5.34 se presentan los equipos utilizados para la realización del ensayo.



*Figura 5.32 Equipo de corte directo marca CONTROLS usado para la ejecución de ensayos de corte directo*

Se realizaron ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU) sobre tres muestras del mismo material del sondeo TAB-1. Las probetas M1, M2 y M3 para los tres puntos del ensayo, se obtuvieron de las muestras M8 y M9. Por medio de estos ensayos se pudo conocer el comportamiento esfuerzo - deformación de cada muestra, y posteriormente se construyeron los respectivos círculos de Mohr para obtener la envolvente de falla y así los parámetros de resistencia al corte, cohesión y ángulo de fricción de acuerdo con la teoría de resistencia al corte de Mohr – Coulomb.

Inicialmente se acondicionaron las muestras, tallándolas a las dimensiones establecidas para el equipo, en este caso muestras con diámetro de cinco centímetros y altura de nueve centímetros. Generalmente se utilizan muestras con alturas de 10 centímetros manteniendo la relación 2/1 (Altura/Diámetro) pero en este caso dado la cantidad reducida de las muestras se optó por altura de nueve centímetros. Las muestras talladas se montaron en las cámaras triaxiales donde se habían colocado previamente filtros en la parte superior e inferior de la muestra, además un filtro perimetral para facilitar la saturación y posterior consolidación de la muestra.



a)



b)

*Figura 5.33 Equipo triaxial GDS, en la parte a) se presenta el equipo triaxial utilizado para las pruebas y en la parte b) se presentan los controladores de Presión / volumen*



a)



b)

*Figura 5.34 Equipo triaxial GDS, en la parte a) se presenta la probeta M2 y en la parte b) se las probetas instaladas en los controladores*

Posteriormente se inició la etapa de saturación donde se controla la presión de la cámara triaxial y la presión dentro de la muestra; se verifica el grado de saturación teniendo en cuenta la presión interna en los vacíos de la muestra. Generando variaciones en la presión de cámara y

verificando la respuesta de la presión interna de los vacíos se realiza el cálculo del parámetro B de Skempton, valor que debe ser superior a 0.95 para determinar que la muestra está saturada. Dentro de este proceso de saturación se alcanzaron los valores para cada muestra que se presentan en la tabla 5.40:

*Tabla 5.40*  
*Presiones de cámara y contrapresión para la realización del ensayo triaxial por punto*

<b>Muestra</b>	<b>Unidad</b>	<b>M3</b>	<b>M2</b>	<b>M1</b>
Presión de cámara	kPa	660.00	660.00	610.00
Contrapresión	kPa	650.00	650.00	600.00

De acuerdo con las condiciones y esfuerzos iniciales calculados para las muestras obtenidas se configuran las presiones de confinamiento necesarias para la construcción de los círculos de Mohr. En este caso se usaron las presiones de 75 kPa, 150 kPa y 300 kPa, con estos confinamientos, se produce una consolidación sobre el material. El equipo registra la variación en el cambio volumétrico (agua que sale de la muestra) y la variación en la presión interna de los vacíos. Al alcanzar el 100% de la consolidación primaria se pasa a la etapa de corte. Las presiones configuradas para la etapa de corte fueron las que se presentan en la Tabla 5.41. En la etapa de corte, después de la etapa de consolidación las muestras pasaron al marco de carga donde se configuró cada una a una velocidad de 0.015 mm/min. El ensayo se detiene al alcanzar el 15% de deformación axial unitaria. En la Figura 5.35 se pueden ver las muestras al finalizar el ensayo triaxial.

*Tabla 5.41*  
*Presiones configuradas para la etapa de corte para el ensayo triaxial*

<b>Muestra</b>	<b>Unidad</b>	<b>M3</b>	<b>M2</b>	<b>M1</b>
Presión de cámara	kPa	725.00	850.00	900.00
Contrapresión	kPa	650.00	650.00	600.00



a)



b)

*Figura 5.35 Muestras al final de la etapa de corte en el ensayo Triaxial – parte a; Muestras después del secado parte b.*

En las Tablas 5.42 y 5.43 se presentan los resultados consolidados de los ensayos de resistencia y deformación que se desarrollaron en las muestras tomadas en campo durante la investigación. Es importante anotar que de los dos ensayos triaxiales programados y ejecutados para el municipio de Tebaida para el sondeo TEB-3 no se pudo obtener los resultados esperados y por lo tanto no se presentan los resultados de dichos ensayos triaxiales. Para la muestra M (de TEB-3 solo se logró el desarrollo de dos puntos del triaxial que no permitieron desarrollar la envolvente de resistencia, por lo cual no se incluye en el resultado final.



Tabla 5.42

Consolidado resultados de laboratorio resistencia y deformación sondeos S-2 y TAB-1 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá

sondeo/muestra	Profundidad (mts)	ENSAYO UU		ENSAYO DE CORTE CD				TRIAxIAL CU				Deformación			RSC	C <sub>c</sub>	C <sub>r</sub>
		Compresión inconfiada		cohesión - c- condición pico y		ángulo fricción - $\Phi$		C (Kpa)	$\Phi$	C' (Kpa)	$\Phi'$	$\sigma'_v$ (kPa)	$\sigma'_p$ (kPa)				
		kg/cm2	qu (kPa)	Kp ( pico)	kPa( res)	$\Phi$ pico	$\Phi$ res										
S2-M3	2,50											27,88	117,64	4,22	0,118	0,027	
S2-M4	4,00			36,5		14,3											
S2-M5	5,50		52,465									42,47	137,29	3,23	0,123	0,024	
S2-M6	7,00		15,741														
S2-M7	8,50		13,96				20	16	2	26		83,65	107,87	1,29	0,127	0,028	
S2-M9	11,50											85,83	137,29	1,60	0,171	0,052	
S2-M10	13,00			64,5		20,5						99,14	186,32	1,88	0,082	0,026	
TAB1-M3	1,50											10,49	63,00	6,01	0,154	0,005	
TAB1-M4	3,10		61,703	1,2	3,2	40,9	34,5					19,47	86,00	4,42	0,247	0,028	
TAB1-M5	3,60		22,774														
TAB1-M6	4,70		54,207	16,8	8,3	29,7	27,6					32,36	114,00	3,52	0,254	0,017	
TAB1-M7	5,20		30,271									101,40	210,00	2,07	0,230	0,030	
TAB1-M8	7,80		12,714									127,74	165,00	1,29	0,260	0,021	
TAB1-M9	8,50		83,005					9	16	0	25						
TAB1-M10	11,60		25,434														
TAB1-M11	14,70											128,91	101,00	0,78	0,156	0,011	

Tabla 5.43

Consolidado resultados de laboratorio resistencia y deformación sondeos MN-1 y TB-3 municipios de Montenegro y Tebaida – departamento de Quindío

sondeo/muestra	Profundidad (mts)	ENSAYO UU		ENSAYO DE CORTE CD				TRIAxIAL CU				Deformación			RSC	C <sub>c</sub>	C <sub>r</sub>
		Compresión inconfiada		cohesión - c- condición pico y		ángulo fricción - $\Phi$		C (Kpa)	$\Phi$	C' (Kpa)	$\Phi'$	$\sigma'_v$ (kPa)	$\sigma'_p$ (kPa)				
		kg/cm2	qu (kPa)	Kp ( pico)	kPa( res)	$\Phi$ pico	$\Phi$ res										
S2-M3	2,50											27,88	117,64	4,22	0,118	0,027	
S2-M4	4,00			36,5		14,3											
S2-M5	5,50		52,465									42,47	137,29	3,23	0,123	0,024	
S2-M6	7,00		15,741														
S2-M7	8,50		13,96				20	16	2	26		83,65	107,87	1,29	0,127	0,028	
S2-M9	11,50											85,83	137,29	1,60	0,171	0,052	
S2-M10	13,00			64,5		20,5						99,14	186,32	1,88	0,082	0,026	
TAB1-M3	1,50											10,49	63,00	6,01	0,154	0,005	
TAB1-M4	3,10		61,703	1,2	3,2	40,9	34,5					19,47	86,00	4,42	0,247	0,028	
TAB1-M5	3,60		22,774														
TAB1-M6	4,70		54,207	16,8	8,3	29,7	27,6					32,36	114,00	3,52	0,254	0,017	
TAB1-M7	5,20		30,271									101,40	210,00	2,07	0,230	0,030	
TAB1-M8	7,80		12,714									127,74	165,00	1,29	0,260	0,021	
TAB1-M9	8,50		83,005					9	16	0	25						
TAB1-M10	11,60		25,434														
TAB1-M11	14,70											128,91	101,00	0,78	0,156	0,011	

En las Figuras 5.36 a 5.38 se presenta la variación de la resistencia al corte a partir de ensayos de compresión simple para las tres zonas piloto.

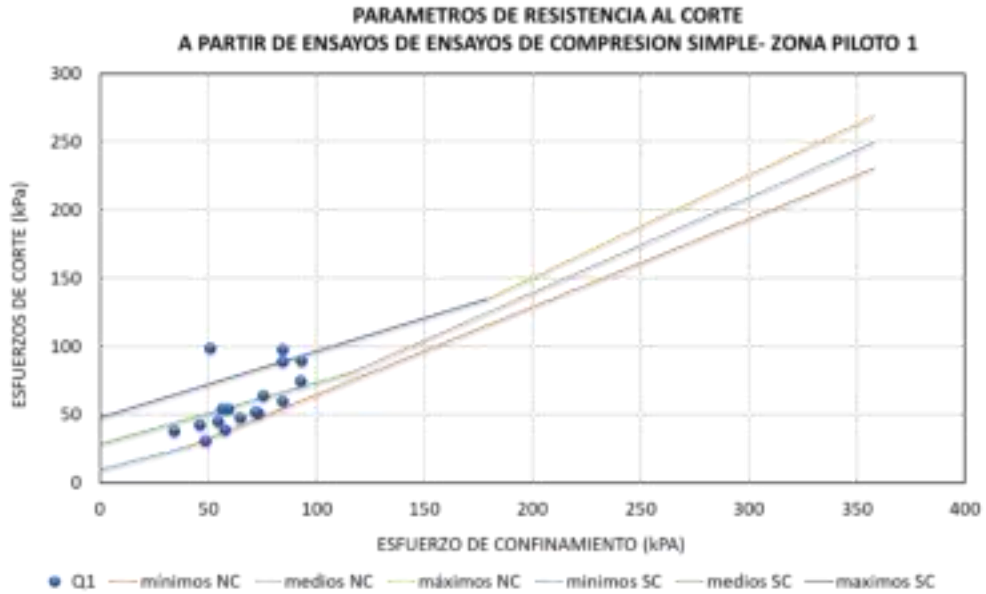


Figura 5.36 Parâmetros de resistência a partir de ensaios de compressão simples zona piloto 1

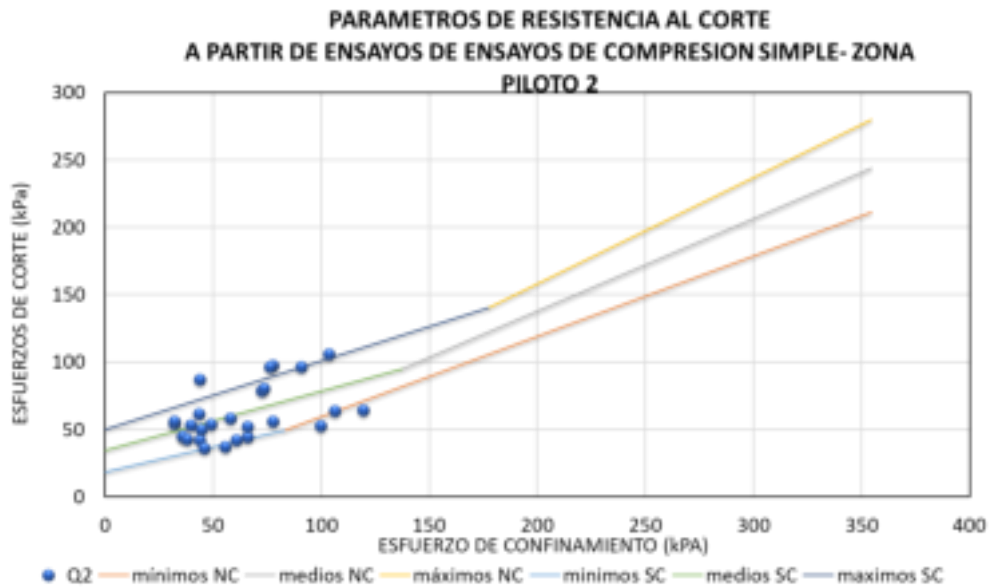
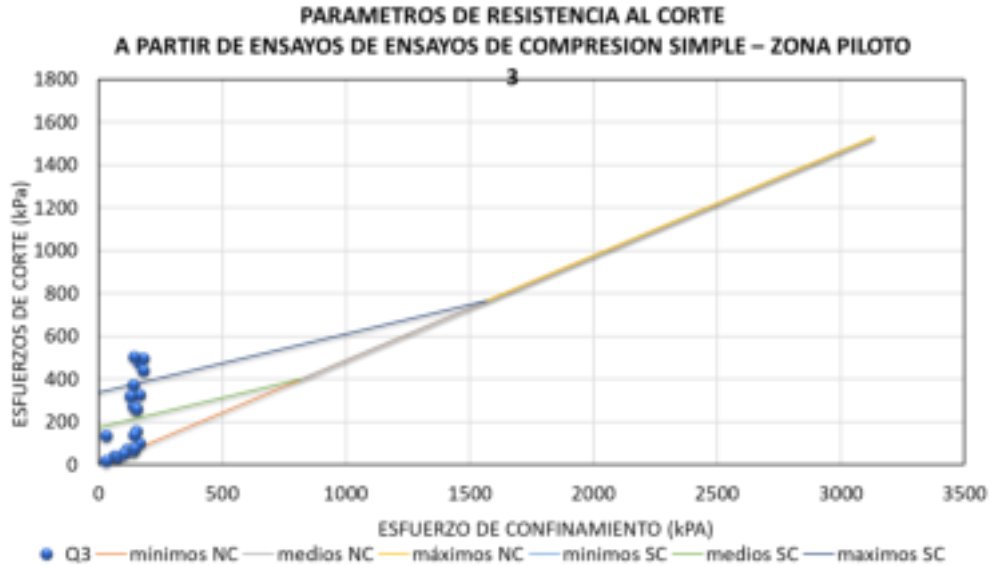


Figura 5.37 Parâmetros de resistência a partir de ensaios de compressão simples zona piloto 2

Los valores de  $S_u$  para la zona piloto 1 son bajos entre 10 y 40 kPa, mientras que los valores de resistencia al corte no drenado de las muestras de La zona piloto 2 son moderados, variables entre 17 y 50 kPa.



*Figura 5.38 Parámetros de resistencia a partir de ensayos de compresión simple zona piloto 3*

A diferencia de las zonas piloto 1 y 2 los valores de resistencia en la zona piloto 3 presentan valores muy superiores y oscilan entre 46 y 908 kPa; estas diferencias de comportamiento se deben al grado de sobre consolidación de los suelos, y a posibles pérdidas de humedad previo a la realización del ensayo.

Igualmente, se presenta en la Figura 5.39 la relación entre el módulo  $E_u$  y la resistencia al corte  $S_u$  para las tres zonas piloto. Se observa que las zonas 1 y 2 presentan un comportamiento con una tendencia ascendente, es decir en lo referente a la rigidez del suelo, las muestras del sector Sabana zona piloto 1 presentan un comportamiento muy rígido con una relación de módulos  $E_u/C_u=1918$ , para el caso de las muestras de Quindío, zona piloto 2, la rigidez es moderada, con valores  $E_u/C_u=868$  y para el caso de las muestras de Barranquilla, zona piloto 3, la Rigidez es baja, con valores de  $E_u/C_u=61$

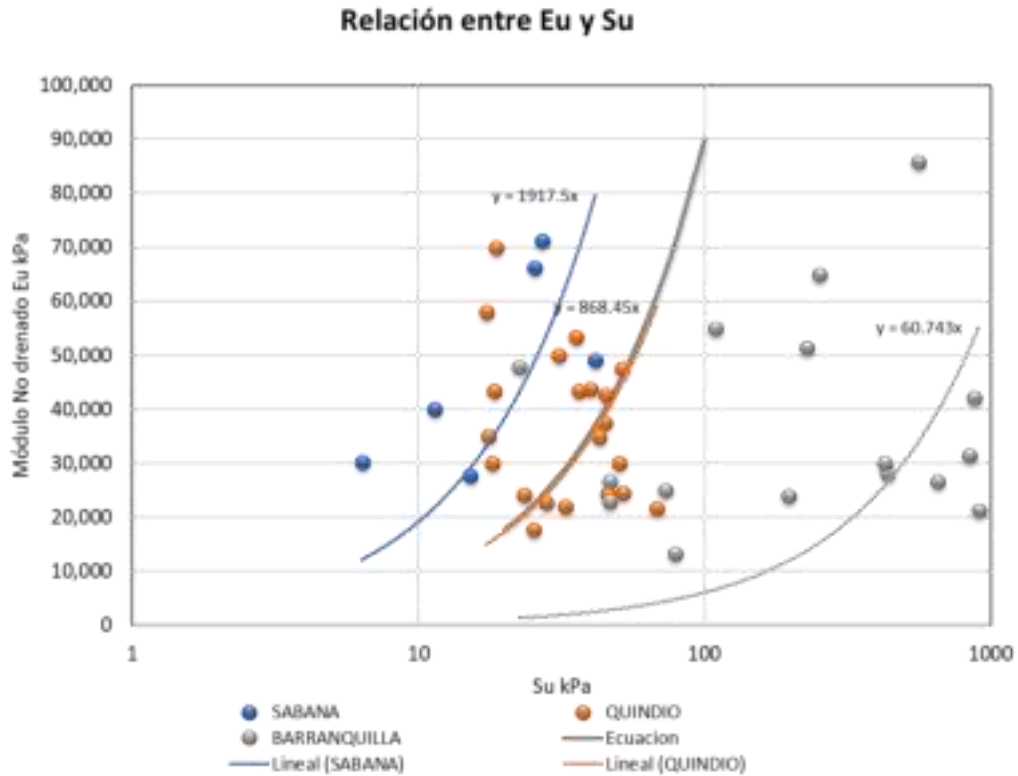


Figura 5.39 Relación entre el módulo Eu y Su para las tres zonas piloto

### 5.6.5 Ensayos Químicos efectuados sobre muestras producto de exploración directa -2019-2021

Estos ensayos se direccionaron para conocer la microfábrica de los materiales y su composición mineralógica. De especial importancia es el estudio de la mineralogía y estructura cristalina en materiales fino-granulares, especialmente para materiales arcillosos, sin embargo y dado que ciertos materiales arcillosos como las alófanas no dan resultados muy adecuados con técnicas como difracción de rayos X- DRX, se usó también como ensayo químico el de Fluorescencia de rayos X- FRX que permite identificar elementos químicos propios de minerales arcillosos que no son fácilmente identificables en ensayos como el DRX.

### 5.6.5.1 Ensayo de Difracción por rayos X – DRX

Se realizaron los siguientes ensayos de DRX sobre las muestras obtenidas de las zonas piloto 1 y 2 en la siguiente forma:

1. Zona Piloto 1: municipio de Tabio: Para el sondeo S2 se realizó el ensayo sobre las muestras M7, M8, M9 y M11; para el sondeo TAB-1 se realizó el ensayo sobre las muestras: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7 M8, M9, M10 Y M11.
2. Zona piloto 2: municipio de Montenegro: para el sondeo MN-1 se realizó el ensayo sobre las muestras M4, M5, M6 Y M8. Para el sondeo TEB-3 se realizó el ensayo sobre las muestras M3, M5, M7 y M8.

Las siguientes son las condiciones generales del ensayo que se aplicaron para la realización del ensayo:

1. Condiciones generales de medida de las muestras: Configuración Standard (sin monocromador). Rango de barrido de  $4^\circ(2\theta)$  a  $70^\circ(2\theta)$ . Tamaño del paso  $0,0167^\circ(2\theta)$ . Tiempo por paso: el tiempo por paso utilizado fue de 55 s a 230 s. Tipo de medida continua. Fuente de rayos X con ánodo de cobre (Cu). Máscara de 15 mm. Rejilla de divergencia en el haz incidente de  $1/2^\circ$ . Rejilla anti dispersiva en el haz incidente  $1^\circ$ . Rejilla anti dispersiva en el haz difractado  $1^\circ$ .
2. Identificación y cuantificación: La identificación y la cuantificación se realizó utilizando la base de datos PDF-4 Minerals v2021 generada por The International Centre for Diffraction Data, usando el software High Score Plus v. 4.8. La cuantificación se realizó utilizando el método de Rietveld.
3. Material de referencia usado: Aragonite AK cuyos valores reportados son Aragonito 45 %, Calcita 54 % y Otros (cuarzo, fluorita, dolomita, feldespato-K) 1 %. Adicionalmente se verifica el instrumento con el material de referencia certificado (MRC) de Corindón NIST

1976a y un patrón de Silicio (disco sinterizado) preparado por el proveedor del equipo a partir del MRC NIST Si 640.

4. Límite de Detección del método: 1 %
5. Criterios de aceptación para duplicados y MR: Para fases presentes en abundancia relativa > 50 % se acepta  $\pm 5$  %Rrel, para fases presentes en abundancia relativa entre 50 % - 10 % se acepta  $\pm 20$  %Rrel y para presentes en abundancia relativa < 10 % se acepta  $\pm 50$  %Rrel.
6. Criterios de aceptación para las muestras: El criterio de aceptación para el refinamiento de las muestras son valores de Goodness of fit menores de 10.
7. La fórmula química reportada en cada fase corresponde a las fórmulas presentes en las tarjetas PDF-4 que presentaron una mayor coincidencia con el perfil de difracción experimental. Para el caso de la Montmorillonita, se describe la formula química general siendo "Ex+y" el catión interlaminar intercambiable. El modelo utilizado para el refinamiento de esta fase corresponde al modelo con tarjeta ICSD No. 161171.
8. Los porcentajes reportados corresponden a la relación entre las fases cristalinas cuantificadas sin considerar el porcentaje de material amorfo presente.
9. Se efectuó una comparación cuidadosa de los difractogramas de los patrones seleccionados contra el de las muestras. Para ello, se tomó como base el principio de identificación de fases por el método Hanawalt (intensidad de picos principales), simulación de patrones.

Los patrones de difracción se muestran en los difractogramas obtenidos, con base en los cuales se realizó una identificación de los minerales presentes y una estimación semicuantitativa. La identificación de las fases minerales fue realizada tomando como base los datos presentados por Moore y Reynolds (1997) como guía tanto para la fase arcillosa como para la no arcillosa. Las condiciones de análisis y tratamiento de las muestras se hicieron con agregado desorientado sin tratamiento - "Bulk": La totalidad de la muestra disgregada y secada al aire se pulverizó, tamizó en la malla No. 200 (0.075 mm) y se montó en un porta muestras de acero inoxidable para el análisis.

Este procedimiento permite identificar la composición general de la muestra y evidencias de algunos minerales de interés. Posteriormente de cada muestra se separó la fracción gruesa ( $> 0.075$  mm) mediante tamizado en seco, se pulverizó esta fracción con mortero hasta alcanzar tamaños  $< 0.075$  mm para luego ser montada en el porta muestras de acero para su análisis.

La estimación se basa en la medida de las áreas de ciertas reflexiones características para cada uno de los minerales presentes, posteriormente corregidas por un factor o poder reflectante de acuerdo al Método de Rietveld, modelo matemático de mínimos cuadrados que permite hacer el refinamiento de estructuras cristalinas y que ha sido aplicado en difracción de rayos X para el análisis cuantitativo de fases cristalinas a través del modelamiento del difractograma punto a punto haciendo uso de patrones hasta lograr la mejor coincidencia entre el difractograma simulado y el medido experimentalmente, este modelo no analiza minerales amorfos porque no se tiene un patrón interno que permita hacer este modelamiento matemático.

En las tablas 5.44 y 5.45 se presentan los resultados de los ensayos DRX sobre las muestras seleccionadas para el municipio de Tabio en Sabana de Bogotá para los sondeos S-2 y TAB1 y en la tabla 5.46 para los municipios de Montenegro y Tebaida MN-1 y TEB-3 respectivamente, en el departamento del Quindío. Igualmente, en las Figuras 5.40 y 5.41 se presentan los difractogramas obtenidos en Tabio en Sabana de Bogotá; en las Figuras 5.42 y 5.43 se presentan los difractogramas obtenidos para los municipios de Montenegro y Tebaida en el departamento del Quindío.

Tabla 5.44  
ensayos químicos DRX - S-2 Tabio – Sabana de Bogotá

No. De Campo/ Referencia	Tipo de Muestra	Fases cristalinas identificadas					Fases cristalinas identificadas					Fases cristalinas identificadas	
		Cuarzo SiO <sub>2</sub> % (g/100g)	Cristobalita SiO <sub>2</sub> % (g/100g)	Moscovita K <sub>0,95</sub> Na <sub>0,05</sub> Mg <sub>0,10</sub> Ti <sub>0,02</sub> Fe <sub>0,15</sub> Al <sub>2,65</sub> Si <sub>3,08</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> % (g/100g)	Clinocloro (Fe) Mg <sub>2,8</sub> Fe <sub>1,75</sub> Al <sub>2,7</sub> Si <sub>2,65</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> % (g/100g)	Caolinita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> % (g/100g)	Montmorillonita (Al <sub>2-y</sub> Mg <sub>y</sub> )(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> F <sub>x+y</sub> ·nH <sub>2</sub> O % (g/100g)	Albita NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> % (g/100g)	Yeso Ca(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> % (g/100g)	Pirita FeS <sub>2</sub> % (g/100g)	Magnetita Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> % (g/100g)	Rutilo TiO <sub>2</sub> % (g/100g)	Anatasa TiO <sub>2</sub> % (g/100g)
S2-M7	SH	66,2	<1,0	10,5	2,4	14,3	<1,0	2,4	1,1	<1,0		<1,0	<1,0
S2-M8	SH	66,2	<1,0	11,7	2,1	14,5	<1,0	2,4			<1,0	<1,0	<1,0
S2-M9	SH	52,9	<1,0	18,2	2,9	19,6	<1,0	2,4			<1,0	<1,0	1,0
S2-M11	SH	60,3	1,0	13,9	1,4	18,3	1,5	2,2				<1,0	1,0

Material de Referencia	Valor certificado		
	Aragonito CaCO <sub>3</sub> % (g/100g)	Calcita CaCO <sub>3</sub> % (g/100g)	Otros (cuarzo, fluorita, dolomita, feldespato-K) % (g/100g)
ARAGONITE_AK	45	54	1



Tabla 5.45  
Resultados ensayos químicos DRX - TAB-1 Tabio – Sabana de Bogotá

No. De Campo/ Referencia	Tipo de Muestra	Fases cristalinas identificadas											Albita (Ca) Na <sub>0,685</sub> Ca <sub>0,347</sub> Al <sub>1,46</sub> Si <sub>2,54</sub> O <sub>8</sub> %(g/100g)	Albita (Ca) Na <sub>0,52</sub> Ca <sub>0,48</sub> Al <sub>1,48</sub> Si <sub>2,52</sub> O <sub>8</sub> %(g/100g)	
		Cuarzo SiO <sub>2</sub> %(g/100g)	Moscovita K <sub>0,95</sub> Na <sub>0,05</sub> Mg <sub>0,10</sub> Ti <sub>0,02</sub> Fe <sub>0,15</sub> Al <sub>2,65</sub> Si <sub>3,08</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> %(g/100g)	Clinocloro (Fe) Mg <sub>2,8</sub> Fe <sub>1,75</sub> Al <sub>2,25</sub> Si <sub>2,65</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> %(g/100g)	Caolinita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> %(g/100g)	Dickita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> %(g/100g)	Vermiculita Mg <sub>3,5</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> %(g/100g)	Montmorillonita (Al <sub>2-4</sub> Mg <sub>1-2</sub> )(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>x</sub> %(g/100g)	Magnesio-hornblenda Na <sub>0,46</sub> Ca <sub>1,70</sub> Mg <sub>5,56</sub> Ti <sub>0,05</sub> Fe <sub>3,31</sub> AlSi <sub>7,27</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>1,8</sub> F <sub>0,2</sub> %(g/100g)	Ortoclase KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> %(g/100g)	Ortoclase (Na, Ba) K <sub>0,59</sub> Na <sub>0,22</sub> Ba <sub>0,19</sub> Al <sub>1,18</sub> Si <sub>2,82</sub> O <sub>8</sub> %(g/100g)	Microclina KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> %(g/100g)			Albita NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> %(g/100g)
N/A	Aragonito	<1,0													
TAB 1-M1	Suelo	24,0	8,7	3,0	17,7		1,2		6,3						33,7
TAB 1-M2	Suelo	17,4	8,2	4,6	17,8		3,5		13,6	2,0				31,9	
TAB 1-M3	Suelo	64,5	9,4		16,3				2,7						5,3
TAB 1-M4	Suelo	58,7	14,7	2,9	18,8			<1,0						2,8	
TAB 1-M5	Suelo	52,4	18,6	2,9	22,4									1,7	
TAB 1-M6	Suelo	54,9	14,5	5,0	14,3	5,2								2,6	
TAB 1-M7	Suelo	57,9	13,8		15,6	5,4		<1,0				2,0		2,3	
TAB 1-M8	Suelo	54,8	16,2	4,8	13,5	5,4					<1,0			2,9	
TAB 1-M9	Suelo	51,7	19,9	4,0	15,3			1,1				6,4			
TAB 1-M10	Suelo	73,7	7,6	2,8	6,3		<1,0		1,9						
TAB 1-M11	Suelo	67,3	7,3	3,7	7,0				3,1						7,7

Material de Referencia	Valor certificado		
	Aragonito CaCO <sub>3</sub> %(g/100g)	Calcita CaCO <sub>3</sub> %(g/100g)	Otros (cuarzo, fluorita, dolomita, feldespato-K) %(g/100g)
ARAGONITE_AK	45	54	1

Tabla 5.46

Resultados ensayos químicos DRX MN1 Y TEB-3, municipios de Montenegro y Tebaida - Quindío

No. De Campo/ Referencia	Tipo de Muestra	Fases cristalinas identificadas							Fases cristalinas identificadas						
		Cuarzo SiO <sub>2</sub> % (g/100g)	Cristobalita SiO <sub>2</sub> % (g/100g)	Moscovita K <sub>0,95</sub> Na <sub>0,05</sub> Mg <sub>0,10</sub> Ti <sub>0,02</sub> Fe <sub>0,15</sub> Al <sub>2,65</sub> Si <sub>3,08</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> % (g/100g)	Vermiculita Mg <sub>3,5</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> % (g/100g)	Caolinita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> % (g/100g)	Montmorillonita (Al <sub>2-3</sub> Mg <sub>1</sub> )(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> F <sub>xy</sub> nH <sub>2</sub> O % (g/100g)	Magnesio-hornblenda Na <sub>0,46</sub> Ca <sub>1,70</sub> Mg <sub>3,56</sub> Ti <sub>0,05</sub> Fe <sub>1,31</sub> AlSi <sub>7,22</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>1,8</sub> F <sub>0,2</sub> % (g/100g)	Magnesio-ferri-fluoro-hornblenda K <sub>0,22</sub> Na <sub>0,4</sub> Ca <sub>1,66</sub> Mg <sub>2,2</sub> Fe <sub>2,94</sub> Al <sub>1,11</sub> Si <sub>6,89</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>0,37</sub> F <sub>1,63</sub> % (g/100g)	Albita NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> % (g/100g)	Albita (Ca) Na <sub>0,622</sub> Ca <sub>0,368</sub> Al <sub>1,29</sub> Si <sub>2,71</sub> O <sub>8</sub> % (g/100g)	Hematita Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % (g/100g)	Aragonita CaCO <sub>3</sub> % (g/100g)	Calcita CaCO <sub>3</sub> % (g/100g)	Dolomita CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> % (g/100g)
N/A	Aragonito	1,0										44,5	52,8	1,1	<1,0
MN 1-M4	SHELBY	12,4	3,6	6,2		17,5	1,6		14,9		43,8				
MN 1-M5	SHELBY	12,3	1,3	6,5		2,9	1,3		16,6		59,1				
MN 1-M6	SHELBY	6,2		18,3	1,2	59,8		6,7		7,7					
MN 1-M8	SHELBY	x	x	x		x					x				

No. De Campo/ Referencia	Tipo de Muestra	Fases cristalinas identificadas							Fases cristalinas identificadas					
		Cuarzo SiO <sub>2</sub> % (g/100g)	Cristobalita SiO <sub>2</sub> % (g/100g)	Moscovita K <sub>0,95</sub> Na <sub>0,05</sub> Mg <sub>0,10</sub> Ti <sub>0,02</sub> Fe <sub>0,15</sub> Al <sub>2,65</sub> Si <sub>3,08</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> % (g/100g)	Vermiculita Mg <sub>3,5</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> % (g/100g)	Caolinita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> % (g/100g)	Montmorillonita (Al <sub>2-3</sub> Mg <sub>1</sub> )(Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> F <sub>xy</sub> nH <sub>2</sub> O % (g/100g)	Magnesio-hornblenda Na <sub>0,46</sub> Ca <sub>1,70</sub> Mg <sub>3,56</sub> Ti <sub>0,05</sub> Fe <sub>1,31</sub> AlSi <sub>7,22</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>1,8</sub> F <sub>0,2</sub> % (g/100g)	Magnesio-ferri-fluoro-hornblenda K <sub>0,22</sub> Na <sub>0,4</sub> Ca <sub>1,66</sub> Mg <sub>2,2</sub> Fe <sub>2,94</sub> Al <sub>1,11</sub> Si <sub>6,89</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>0,37</sub> F <sub>1,63</sub> % (g/100g)	Albita NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> % (g/100g)	Albita (Ca) Na <sub>0,622</sub> Ca <sub>0,368</sub> Al <sub>1,29</sub> Si <sub>2,71</sub> O <sub>8</sub> % (g/100g)	Anortita CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> % (g/100g)	Hematita Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % (g/100g)	Goethita (Al) Fe <sub>0,93</sub> Al <sub>0,07</sub> O(OH) % (g/100g)
N/A	Aragonito	1,0												
TEB 3-M3	SHELBY	7,8	2,0	9,4		30,2	1,5		4,4		38,3	6,5		
TEB 3-M5	SHELBY	15,1	1,0	9,3		6,5	<1,0		11,3		56,1			
TEB 3-M7	SHELBY	8,1		20,5	<1,0	46,0		7,9		16,8				
TEB 3-M8	SHELBY	1,2	1,8	22,1		72,5							<1,0	2,1

Material de Referencia	Valor certificado		
	Aragonito CaCO <sub>3</sub> % (g/100g)	Calcita CaCO <sub>3</sub> % (g/100g)	Otros (cuarzo, fluorita, dolomita, feldespato-K) % (g/100g)
ARAGONITE_AK	45	54	1

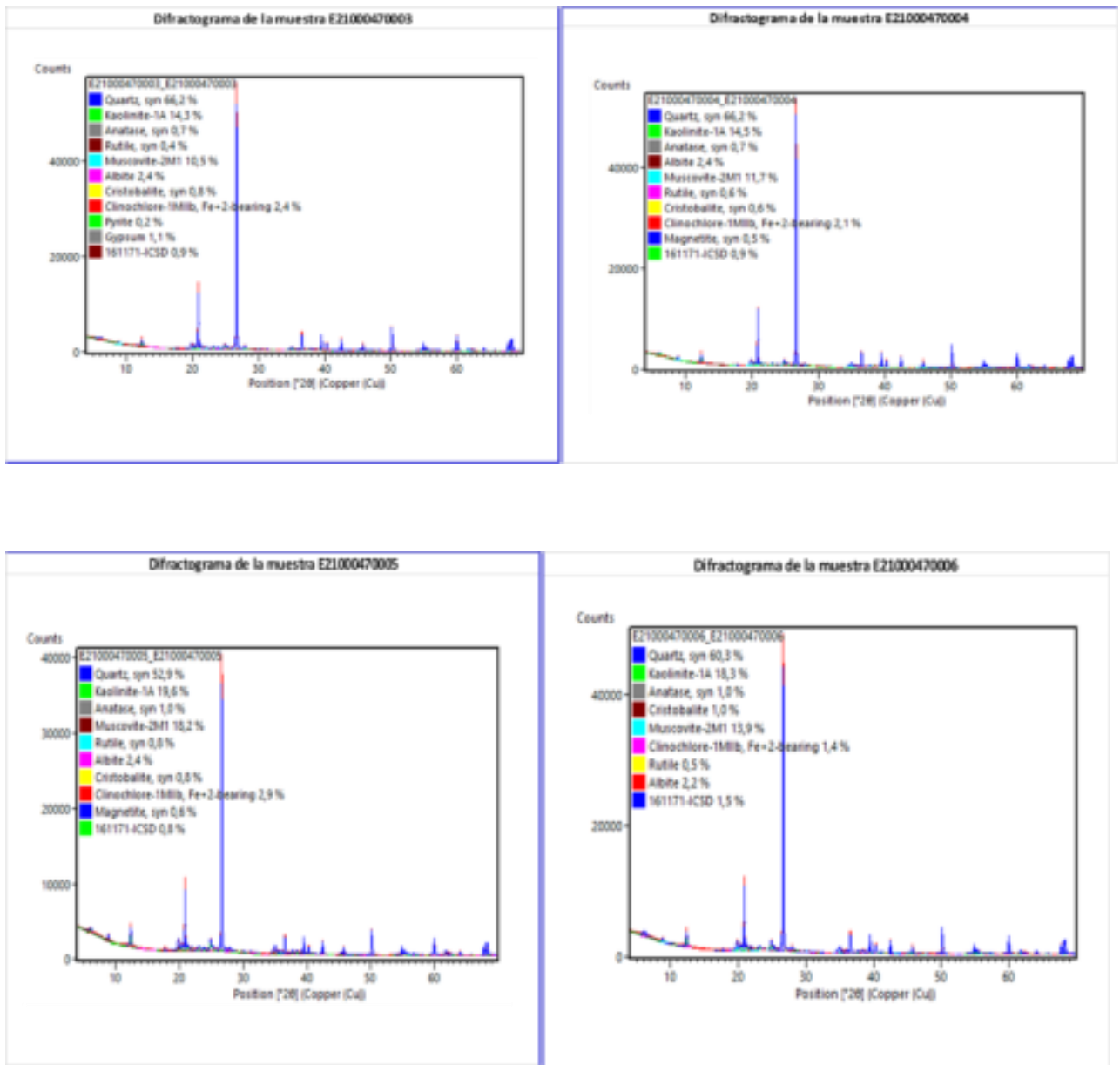


Figura 5.40 Diffractogramas muestras S-2 Tabio – Sabana de Bogotá

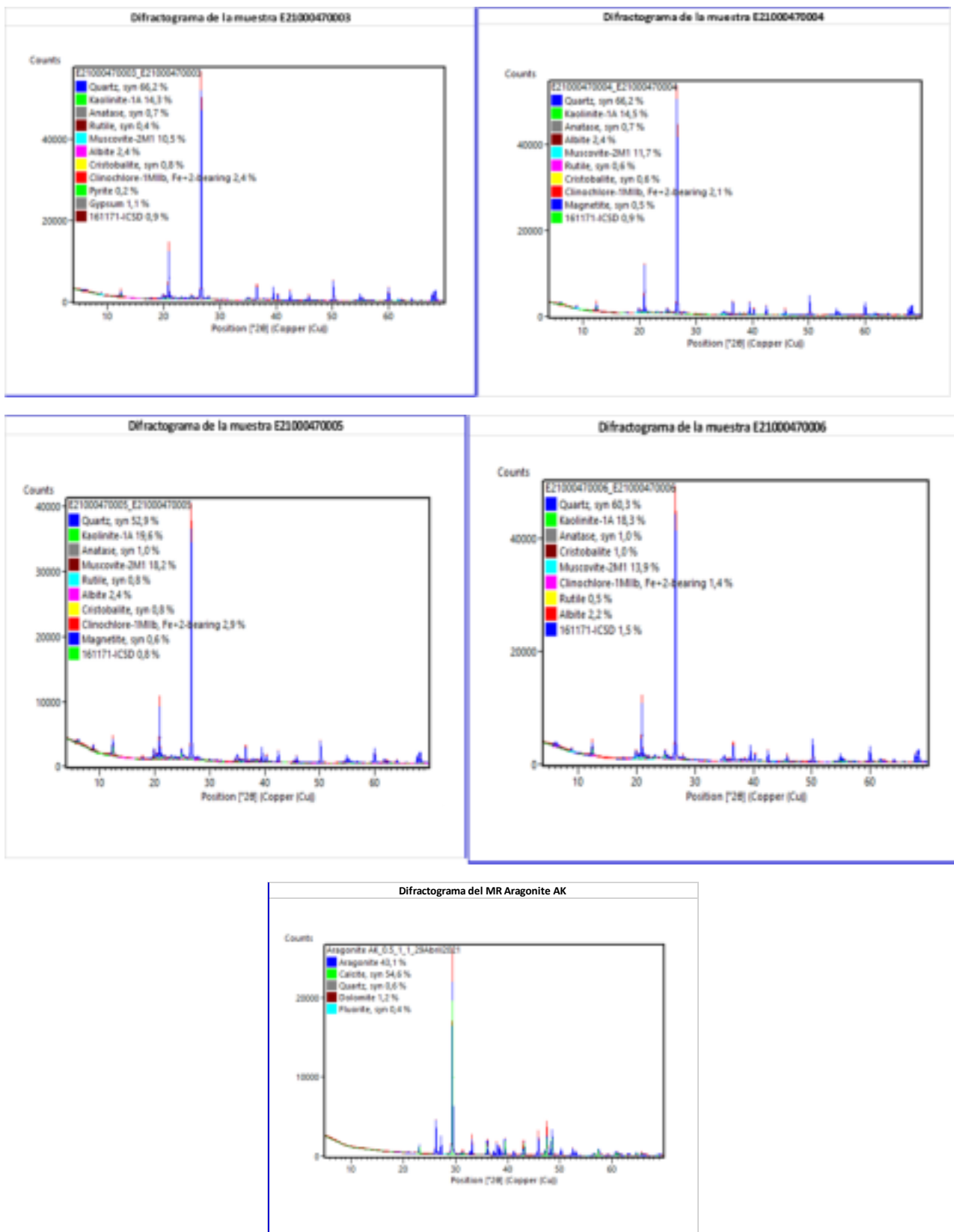


Figura 5.41 Diffractogramas muestras Tab-1 Tabio – Sabana de Bogotá

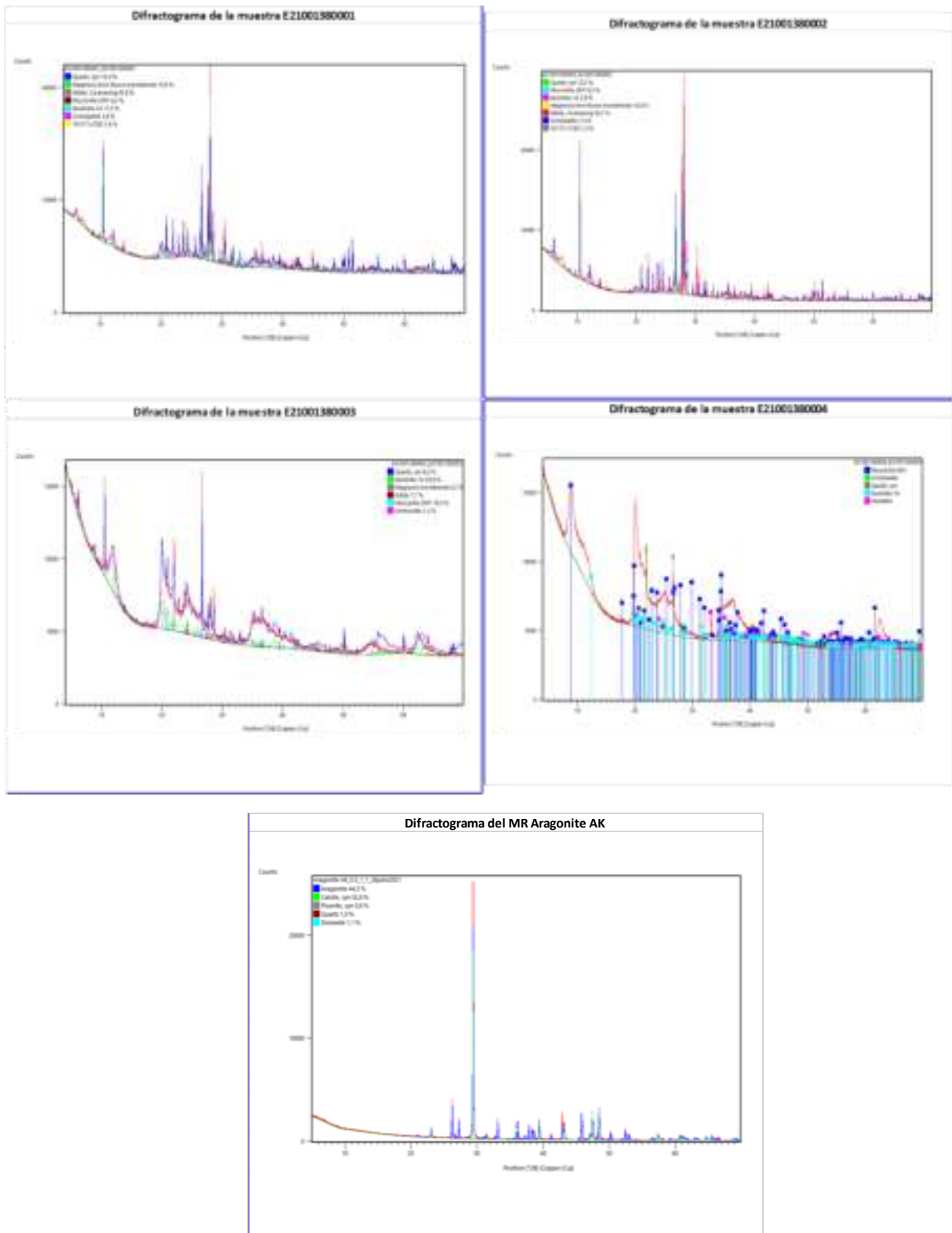


Figura 5.42 Difractogramas muestras MN-1- Montenegro- Quindío

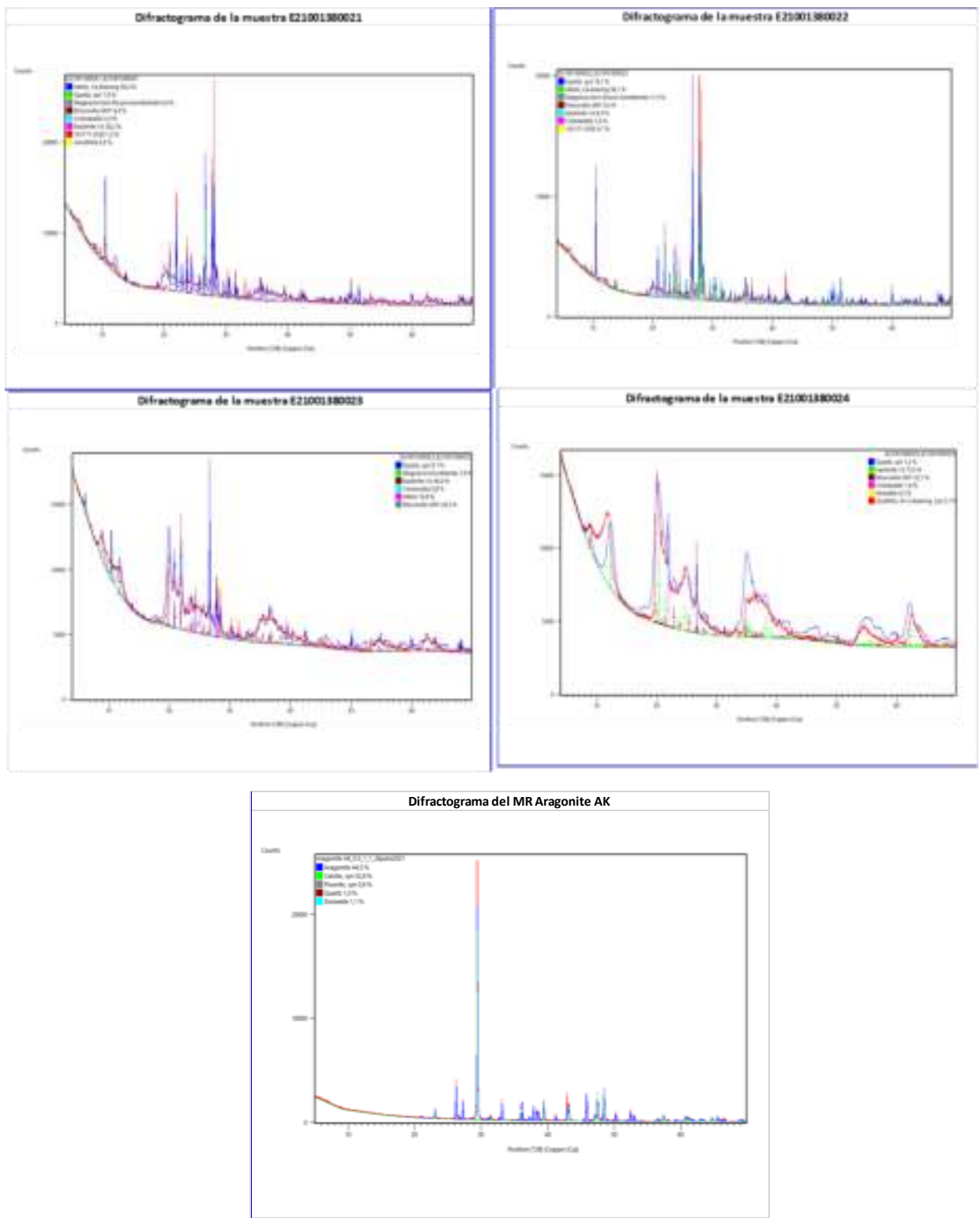
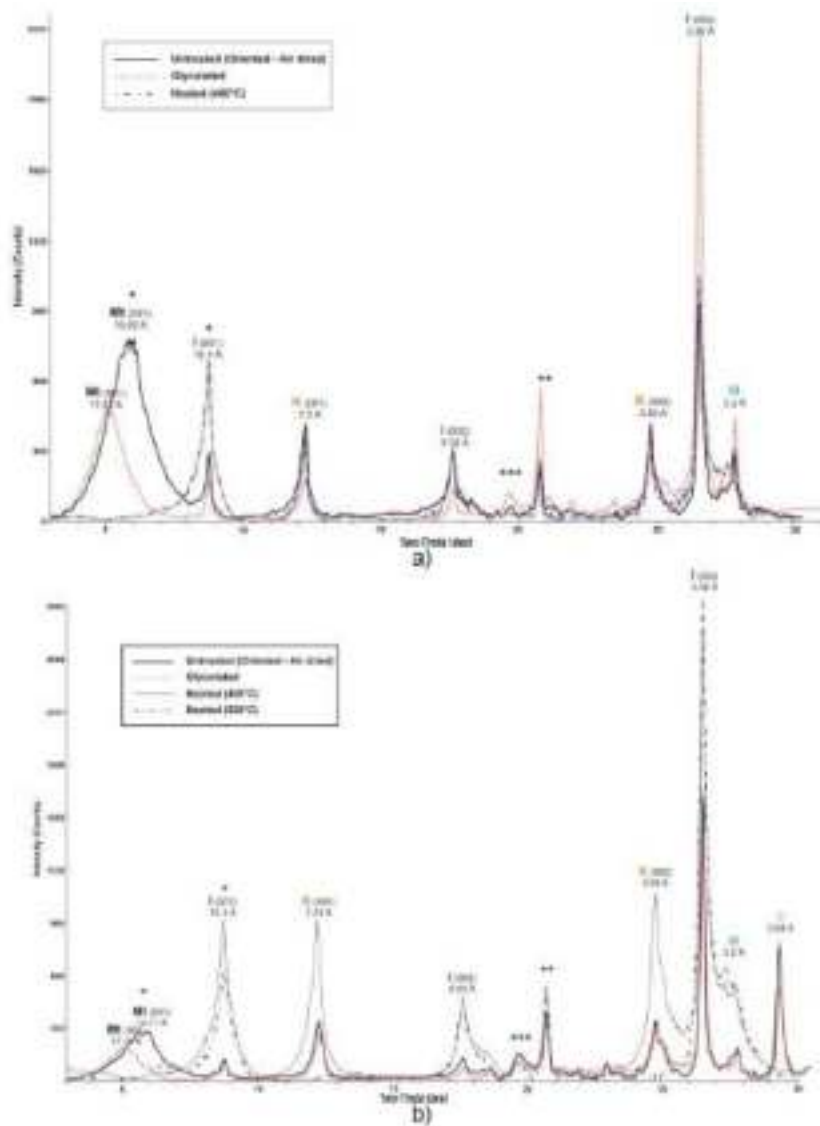


Figura 5.43 Diffractogramas muestras TEB-3- Tebaida- Quindío

De la información existente para el sector Loma Verde en el municipio de Barranquilla, se tienen ensayos mineralógicos (Rodríguez, 2014) mediante el ensayo de DRX en agregado desorientado sin tratamiento (Bulk) para cuatro muestras representativas del perfil litológico con el fin de confirmar las fases minerales arcillosas y no arcillosas identificadas mediante los ensayos de propiedades índice. En la Figura 5.44 se presentan los difractogramas obtenidos para las muestras M2, M6, M7 y M11.



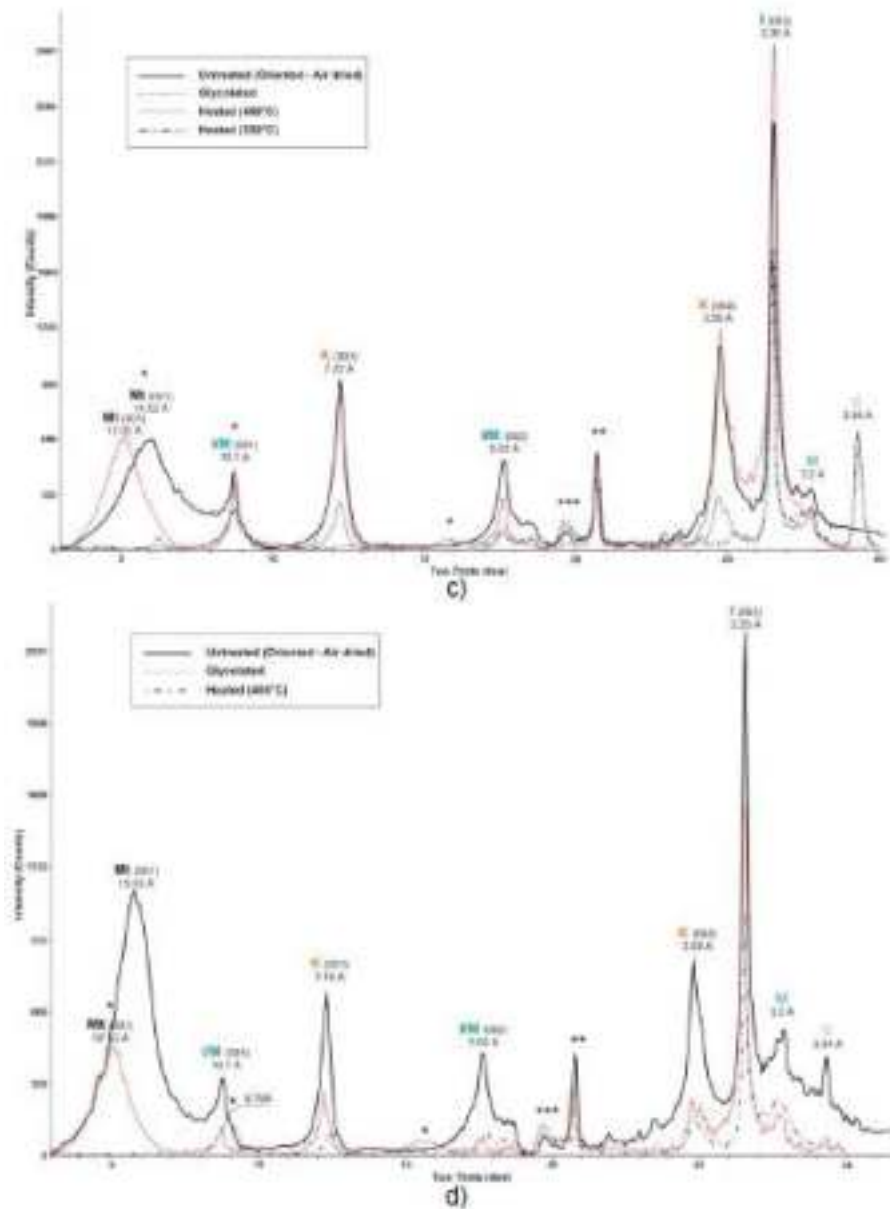


Figura 5.44 Difractogramas ensayo DRX- muestras M2, M6, M7 Y M11, Zona piloto 3, Municipio de Barranquilla- Fases Cristalinas Mt ( montmorillonita), micas (I y M Muscovita), K (caolinita), C ( calcita). Los picos denotados por asteriscos están asociados posiblemente con interstratificados (tomado de Rodriguez, 2011).

Se aplicó también la técnica de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR); Los espectros obtenidos para la fracción fina (< 0.075 mm) de tares muestras se presentan en la Figura 5.45 y se puede observar que concuerdan con los obtenidos mediante DRX:



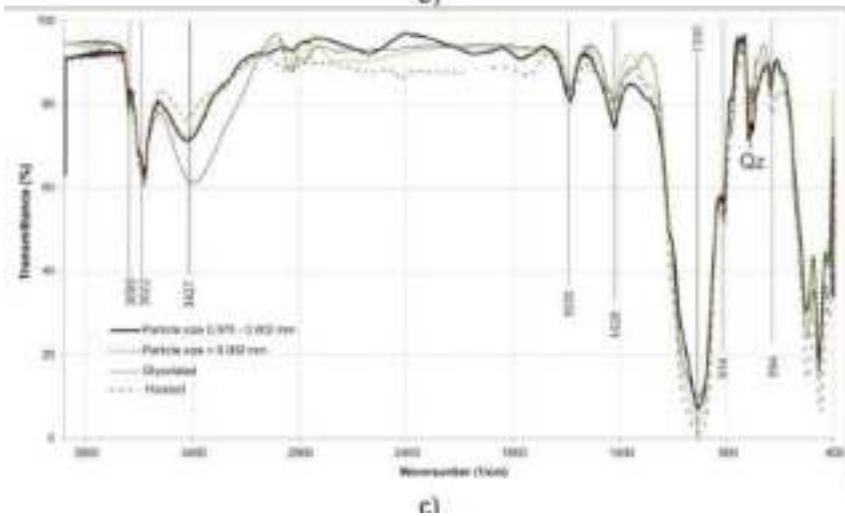
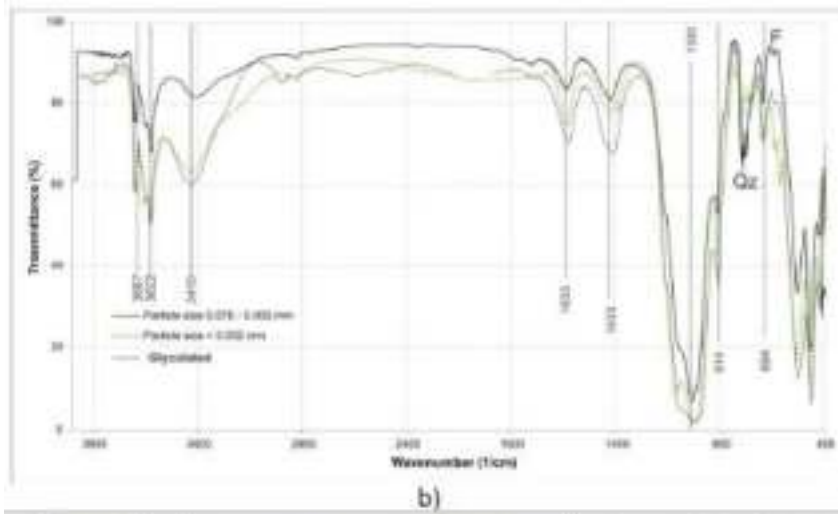
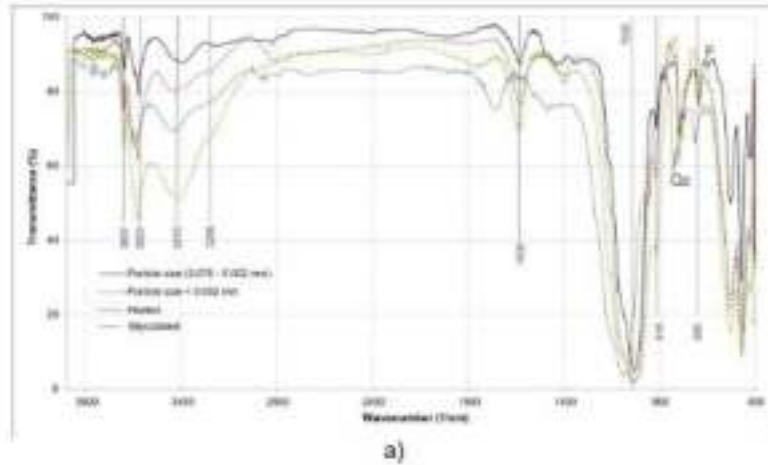


Figura 5.45 Espectro FTIR para la fracción fina (< 0.075 mm) de las arcillas de Barranquilla, M2, M7, M11, Fases cristalinas: F feldspatos, Qz cuarzo. (tomado de Rodríguez, 2011)

### 5.6.5.2 Ensayo de Fluorescencia por rayos X – FRX

Se realizaron los siguientes ensayos de FRX sobre las muestras obtenidas de las zonas piloto 1 y 2 en la siguiente forma:

1. Zona Piloto 1: municipio de Tabio: Para el sondeo S2 se realizó el ensayo sobre las muestras M7, M8, M9 y M11.
2. Zona piloto 2: municipio de Montenegro: para el sondeo MN-1 se realizó el ensayo sobre las muestras M4, M5, M6 Y M8. Para el sondeo TEB-3 se realizó el ensayo sobre las muestras M3, M5, M7 y M8.

Las siguientes son las condiciones generales del ensayo que se aplicaron para la realización del ensayo:

- Material seleccionado y preparado a malla -200 (75mm).
- El material fue secado, calcinado, pesado y homogenizado antes de transferir al crisol de aleación Au/Pt.
- Posteriormente se fundió en la perladora usando el programa de fusión correspondiente, para su posterior desmolde y rotulación.
- Se realizaron los análisis en el espectrómetro de fluorescencia de rayos X, posteriormente la validación de los datos obtenidos incluyendo el diligenciamiento de las cartas de control.

En las tablas 5.47 a 5.49 se presentan los resultados de los ensayos FRX sobre las muestras seleccionadas para el municipio de Tabio en Sabana de Bogotá para los sondeos S-2 y TAB1 y para los municipios de Montenegro y Tebaida MN-1 y TEB-3 respectivamente, en el departamento del Quindío.

Tabla 5.47  
Resultados ensayos químicos DRX-FRX S-2 Y Tab-1 Tabio – Sabana de Bogotá. Parte 1

TÉCNICA					FLUORESCENCIA DE RAYOS X - FRX									GRAVIMETRIA		
SECUENCIA	LOTE DE ANALISIS	TIPO	ID MUESTRA	REFERENCIA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn	LOI	
					(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	ppm	(%)
					g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	mg/kg	g/100 g
1	1	MRC	GSR-5	---	59,40	0,69	18,78	7,92	1,99	0,64	0,41	4,21	0,156	195	5,57	
4	1	M	E21000470003	S2-M7	76,69	1,04	13,14	1,47	0,51	0,11	0,26	0,89	0,066	< 123	5,55	
5	1	M	E21000470004	S2-M8	75,62	0,98	13,51	1,88	0,58	0,14	0,28	0,99	0,059	< 123	5,67	
6	1	M	E21000470005	S2-M9	62,87	0,94	16,65	2,61	0,68	0,23	0,27	1,32	0,064	< 123	14,09	
7	1	M	E21000470006	S2-M11	68,57	0,95	16,12	1,90	0,61	0,19	0,25	1,02	0,071	< 123	10,04	
LIMITES DE CUANTIFICACIÓN					0,36	0,04	0,18	0,10	0,10	0,10	0,11	0,08	0,024	123	0,10	
MRC					VALOR CERTIFICADO											
					SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn	LOI	
					(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	ppm	(%)	
					g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	mg/kg	g/100 g	
GSR-5					Valor Certificado	59,23	0,66	18,82	7,60	2,01	0,60	0,35	4,16	0,158	173	(5,95)

Reportados en Base Seca  
 NR: No Reportado  
 MI: Muestra Insuficiente  
 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>T: Fe total expresado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 TIPO: M: Muestra, D: Duplicado de laboratorio, DP: Duplicado de preparación, MRC: Material de Referencia Certificado

Tabla 5.48  
Resultados ensayos químicos DRX-FRX S-2 Y Tab-1 Tabio – Sabana de Bogotá. Parte 2

TÉCNICA					FLUORESCENCIA DE RAYOS X - FRX									GRAVIMETRIA		
SECUENCIA	LOTE DE ANALISIS	TIPO	ID MUESTRA	REFERENCIA	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn	LOI	
					(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	ppm	(%)
					g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	mg/kg	g/100 g
1	1	MRC	GSR-5	---	59,40	0,69	18,78	7,92	1,99	0,64	0,41	4,21	0,156	195	5,57	
4	1	M	E21000470003	S2-M7	76,69	1,04	13,14	1,47	0,51	0,11	0,26	0,89	0,066	< 123	5,55	
5	1	M	E21000470004	S2-M8	75,62	0,98	13,51	1,88	0,58	0,14	0,28	0,99	0,059	< 123	5,67	
6	1	M	E21000470005	S2-M9	62,87	0,94	16,65	2,61	0,68	0,23	0,27	1,32	0,064	< 123	14,09	
7	1	M	E21000470006	S2-M11	68,57	0,95	16,12	1,90	0,61	0,19	0,25	1,02	0,071	< 123	10,04	
LIMITES DE CUANTIFICACIÓN					0,36	0,04	0,18	0,10	0,10	0,10	0,11	0,08	0,024	123	0,10	
MRC					VALOR CERTIFICADO											
					SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn	LOI	
					(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	ppm	(%)	
					g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	g/100 g	mg/kg	g/100 g	
GSR-5					Valor Certificado	59,23	0,66	18,82	7,60	2,01	0,60	0,35	4,16	0,158	173	(5,95)

Reportados en Base Seca  
 NR: No Reportado  
 MI: Muestra Insuficiente  
 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>T: Fe total expresado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 TIPO: M: Muestra, D: Duplicado de laboratorio, DP: Duplicado de preparación, MRC: Material de Referencia Certificado



## **5.6.6 Composición mineralógica predominante por zona piloto**

### **5.6.6.1 Zona piloto 1: Sabana de Bogotá- municipio de Tabio**

En las figuras 5.46 y 5.47 se observa la variación en profundidad del porcentaje de los principales minerales cristalinos identificados mediante los ensayos de composición mineralógica efectuados; los análisis para las muestras tomadas en campo para el sondeo S-2, muestran una presencia importante de filosilicatos, con predominancia de caolinitas en porcentajes que van de 14.6% a 19.6% (entre 8.0 y 13.0 metros) en profundidad, así como moscovita entre 10.5% a 18.2%. Predomina el cuarzo con porcentajes entre 66.2% y 60.3% en profundidad (aproximadamente 13.0 metros); para el sondeo TAB-1 se logró disponer de mayor cantidad de ensayos a lo largo de toda la profundidad, en donde se observa que predomina el cuarzo con porcentajes entre el 17% al 73% aumentando en profundidad, seguido por caolinita con porcentajes variables entre 7% a 18% disminuyendo levemente en profundidad y la moscovita entre 7.3 a 18.6%; para este sondeo no se encontró montmorillonita.

Es importante anotar que la presencia de minerales arcillosos se puede observar en un valor total de filosilicatos que varía por muestra entre ... y ....., predominando la presencia de caolinita y moscovita las cuales dan características geomecánicas importantes a los suelos; sin embargo, predomina el cuarzo en el perfil con porcentajes que alcanzan el 73%. Igualmente, es de anotar que el mayor porcentaje de elementos presentes está representado en óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), presentes comúnmente en el cuarzo y algunos minerales arcillosos como los indicados.

En el ensayo de DRX en las muestras del sondeo TAB-1, se identificó la presencia de mica, sin embargo, la forma y amplitud de los picos que caracterizan este mineral, así como el patrón de difracción luego de la calcinación de este material, indican la posible presencia de interestratificados tipo mica/esmectita, sin embargo, es difícil establecer su presencia por estar mezclados.

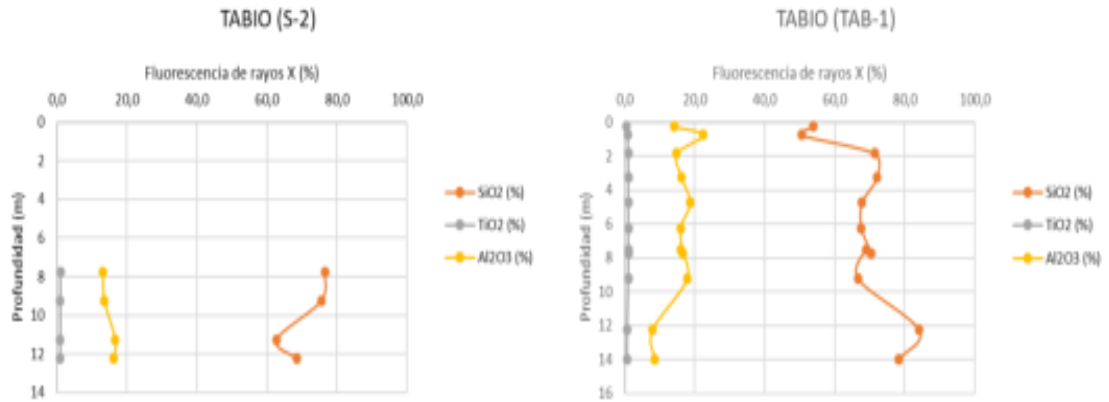


Figura 5.46 Variación de elementos en muestras S-2 y TAB-1 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá, ensayo FRX

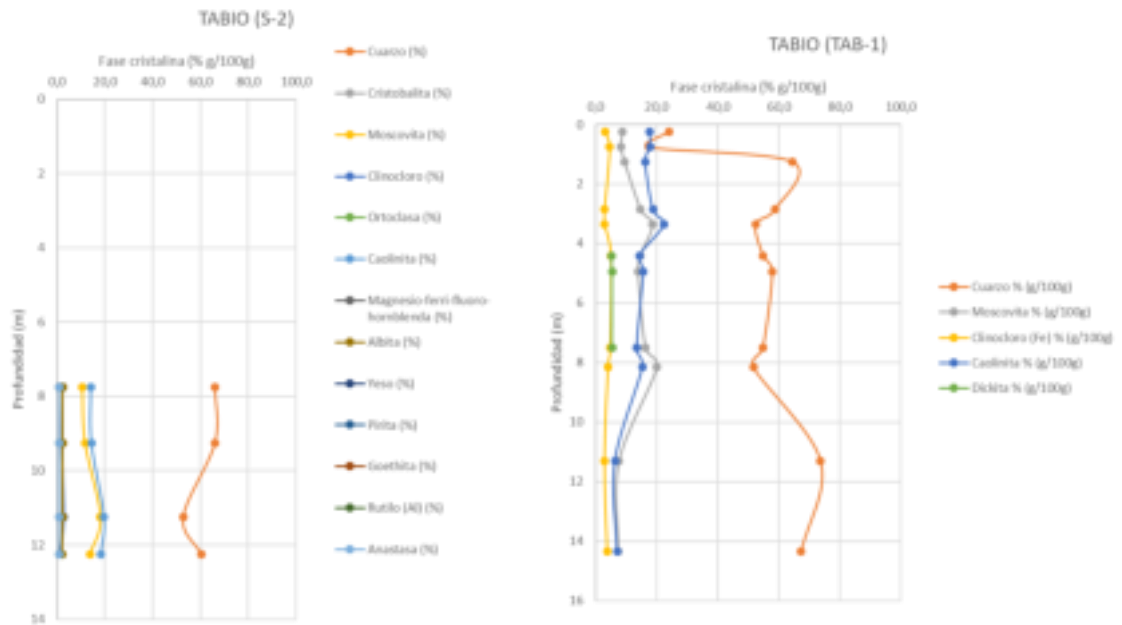


Figura 5.47 Variación de minerales en muestras S-2 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá, ensayo DRX

### 5.6.6.2. Zona piloto 2: Quindío- municipios de Montenegro y Tebaida

Como se observa de las figuras 5.48 y 5.49, los análisis de composición mineralógica para las muestras tomadas en campo (DRX), al igual que para la zona piloto 1, se tiene una presencia importante de filosilicatos que varía entre ... y ....., siendo los minerales de mayor presencia las

caolinitas en porcentajes que van de 17.5% a 30.2% en el nivel litológico A y entre 46% a 70.5 % en el nivel litológico B, seguido de cuarzo que alcanza el 15% y moscovita que alcanza en profundidad el 22%, se observa presencia de montmorillonita en porcentajes muy bajos menores al 2%; igualmente del análisis de los difractogramas del ensayo de DRX (Figuras 5.42 y 5.43) se pudo evidenciar desorden en su estructura, lo cual es muy característico de minerales amorfos como las alófanas, mineral característico de suelos de origen volcánico. Igualmente es de anotar que tal como en Sabana, la composición química identificada a partir del ensayo FRX (tabla 5.50) está representada en óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), con altos contenidos, muy característicos de alófanas para este mineral. Adicionalmente, entre otros óxidos importantes, se registra la presencia  $\text{Na}_2\text{O}$ , presentes comúnmente en el cuarzo y algunos minerales arcillosos como los indicados.

*Tabla 5.50*

*Composición química predominante de los materiales muestreados en los municipios de Montenegro, Tebaida y Armenia - Quindío- Información primaria y secundaria, obtenidos mediante el ensayo FRX*

<b>No. De Campo/ Referencia</b>	<b>Profundidad media(m)</b>	<b><math>\text{SiO}_2</math> (%)</b>	<b><math>\text{TiO}_2</math> (%)</b>	<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> (%)</b>	<b><math>\text{Na}_2\text{O}</math> (%)</b>
MN 1-M4	4,7	54,7	0,83	22,7	2,2
MN 1-M5	6,5	55,1	0,81	21,7	2,8
MN 1-M6	9,3	44,4	1,31	28,5	0,45
MN 1-M8	13,4	41,0	1,37	33,25	0,19
TEB 3-M3	1,5	54,1	0,8	22,7	1,8
TEB 3-M5	3,7	56,9	0,7	21,9	2,6
TEB 3-M7	7,3	44,5	1,33	28,1	0,5
TEB 3-M8	10,7	42,0	1,51	33,4	0,2

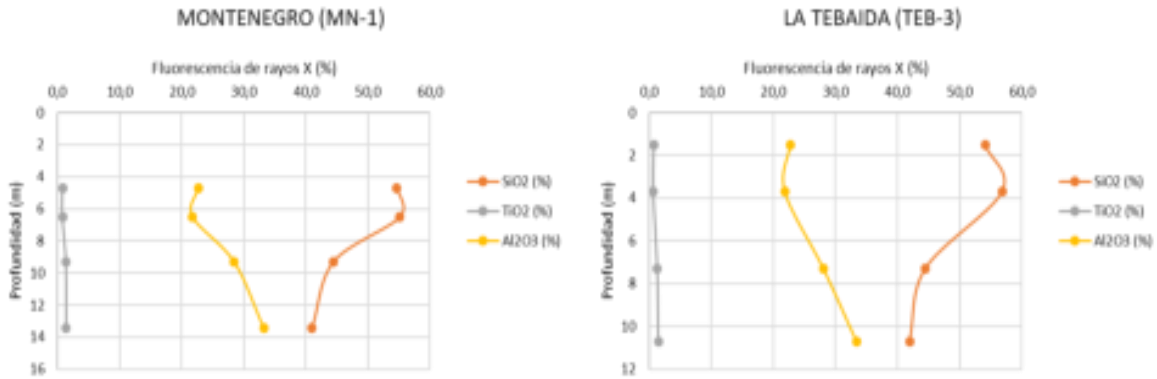


Figura 5.48 Variación de elementos en muestras S-2 y TAB-1 municipio de Tabio – Sabana de Bogotá, ensayo FRX

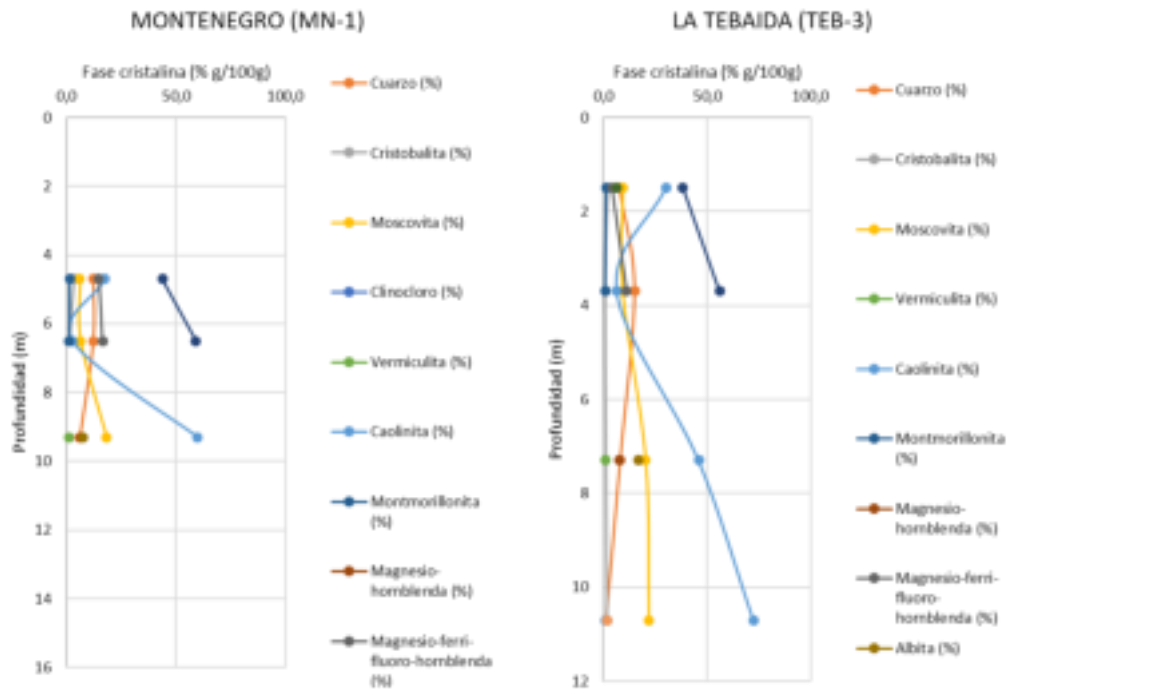


Figura 5.49 Variación de minerales en muestras MN-1 y TEB-3 municipios de Montenegro y Tebaida – Quindio, ensayo DRX

Con el análisis de los difractogramas presentados en el capítulo cinco de las muestras MN1-M4, MN1-M6, MN1-M8 y TEB3- M3, TEB3-M5, se puede pensar que existe la presencia de minerales amorfos tipo alófanas en las muestras estudiadas, dado el desorden visible en la estructura; adicionalmente la amplitud que presentan las bandas en el difractograma son propias de la presencia de minerales arcillosos en las muestras.



### 5.6.6.3. Zona piloto 3: Barranquilla- sector Loma Roja

Los resultados de los ensayos DRX y FTIR existentes (Rodríguez, 2014), para determinar la presencia de minerales arcillosos en los suelos y algunos elementos predominantes asociados a silicatos, permiten concluir lo siguiente: Del ensayo DRX, se identificaron las siguientes fases minerales y su abundancia relativa : *“para el nivel litológico A se identificaron cuarzo (++) , feldespato (+), montmorillonita (-) y caolinita (-); en el nivel litológico B calcita (++) , cuarzo (++) , feldespato (+), caolinita (-) y micas(-); finalmente en el nivel litológico C cuarzo (++) , feldespato (++) , calcita (-), mica (-) y montmorillonita (-). En el Nivel más superficial desapareció el yeso y las micas y se hizo evidente la montmorillonita. Los niveles subyacentes son característicos por la por la escasa presencia de micas y minerales de arcilla, y la marcada presencia de calcita, no solo como restos de microorganismos calcáreos”* (Rodríguez, 2014). El análisis mineralógico muestra no existencia de calcita en el nivel litológico superior (A) debido a *“disolución y transporte por efecto de meteorización”* (Rodríguez, 2014) El ensayo FTIR permitió verificar los resultados del ensayo DRX evidenciando la presencia de caolinita, montmorillonita, y micas (Illita/yo moscovita).

## 5.7 Discusión general y conclusiones

En el presente capítulo se describieron los resultados del programa de trabajo documental y experimental que se siguió para el alcance de los objetivos de la investigación, en orden secuencial. En primer lugar y de acuerdo a los trabajos de caracterización geológico –geomorfológica-geotécnica desarrollados y presentados, efectuados con base en información secundaria geológico – geomorfológica y geotécnica, información de exploración directa y análisis de oficina, algunos de los cuales permitieron desarrollar un modelo geológico – geomorfológico adecuado a las necesidades de esta investigación y una delimitación local a nivel de las zonas de estudio, se resumen enseguida las actividades y ensayos de laboratorio aplicados, sus alcances y resultados principales para el logro de los objetivos de esta investigación en la siguiente forma:

La propuesta de modelo geológico – geomorfológico partió de un análisis regional a escala 1:25.000 para las tres zonas piloto, y ella permitió a través de un análisis multiescala con el uso de ARC GIS, delimitar las UGS de interés descritas en el capítulo 4 y las subunidades geomorfológicas, que posteriormente se cruzaron con la información geotécnica existente en cada zona piloto: para

el análisis de la información geotécnica por zona piloto se desarrolló para esta investigación una base de datos en la cual se efectuó el análisis de información de laboratorio geotécnico existente con datos de 2004 a 2011 de información propia del Servicio Geológico y alguna información externa existente, dando como resultado la existencia de 171 puntos de exploración geotécnica con 1384 muestras de las cuales se tienen 2896 resultados de ensayos de laboratorio de caracterización básica, 116 ensayos de resistencia y deformación y 32 ensayos químicos; esta información fue analizada y depurada con el fin de identificar los resultados de ensayos cumpliendo los estándares mínimos requeridos por la normatividad vigente (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, ASTM).

A partir de este análisis inicial se identificaron zonas de estudio a nivel local que cumplen además con los requerimientos fisiográficos establecidos para esta investigación, dando como resultado la identificación de zonas de estudio locales así: para la zona Piloto 1 – Sabana de Bogotá, se identificaron los municipios de Tabio y Tenjo, siendo Tenjo posteriormente retirado de la evaluación dado el tipo predominante de suelos presentes, que cumple con las especificaciones requeridas para esta investigación, teniendo para Tabio un total de 30 puntos de exploración y 156 muestras; para la zona piloto 2 , departamento del Quindío, se seleccionaron los municipios de Montenegro, Tebaida y Armenia, con un total de 108 puntos de exploración y 911 muestras y la zona piloto 3, Barranquilla, en el sector de Loma Roja con 17 puntos de exploración y 207 muestras.

Para cada zona piloto se seleccionaron los puntos de muestreo y las muestras que cumplen con los criterios de evaluación y que corresponden con el tipo de material en evaluación, en este caso materiales de clasificación geotécnica tipo CH, CL, es decir materiales predominantemente arcillosos; en esta fase del proyecto se dio prioridad a muestras predominantemente arcillosos, sin embargo se incluyeron materiales que en su clasificación pueden presentarse como limos arcillosos o arcillas limosas tipo (ML-CL o CL-ML) dado lo comentado respecto de la clasificación de los materiales en el capítulo 4.

Dada la necesidad de complementar la información geotécnica existente se requirió incluir datos de exploración directa con toma de muestras controlada para la ejecución de ensayos de resistencia y deformación adicionales; para ello se tomó información de cuatro sondeos efectuados en la siguiente forma: dos sondeos en el municipio de Tabio – zona piloto 1, identificados como TAB-

1 y S2 y dos sondeos en la zona piloto 2: uno en el municipio de Montenegro MN-1 y uno en el municipio de Tebaida TEB-3.

Posteriormente, mediante el uso de los programas QGIS versión 3.4.8. y AutoCAD 2018, se pudieron construir modelos geológicos promedio y perfiles estratigráficos con el fin de verificar el cumplimiento de los requerimientos identificados para uso de la información geotécnica en esta investigación; como información geológica de entrada se usaron los datos de Unidades Geológicas Superficiales - UGS que se describieron en capítulos iniciales. Esta información permitió la observación integral de las zonas piloto finalmente seleccionadas con el fin de generar un modelo geológico 2D y generar una sección transversal tipo de análisis.

De la exploración directa usada para esta investigación, en la zona piloto 1; municipio de Tabio se tienen datos directos de 29.7 metros de exploración con recuperación de 22 muestras inalteradas y para la zona piloto 1, municipios de Montenegro y Tebaida 27.4 metros de exploración con recuperación de 17 muestras inalteradas. Con el fin de evaluar los resultados de ensayos de laboratorio efectuados en forma controlada para esta investigación, se analizan resultados de ensayos de caracterización básica, resistencia y deformación, ensayos químicos que se efectuaron sobre muestras seleccionadas en la siguiente forma: zona piloto 1- municipio de Tabio y zona piloto 2 municipios de Montenegro y Tebaida: 237 ensayos de caracterización básica, 34 ensayos de resistencia y deformación, 40 ensayos químicos. La zona piloto 3 – Barranquilla sector Loma Roja ya contaba con ensayos de resistencia y deformación y algunos ensayos químicos.

Para la caracterización básica se realizaron ensayos convencionales de granulometría por tamizado, hidrometría, límites de Atterberg (incluyendo en algunos casos el límite de contracción), Gravedad específica – Gs, peso unitario, usando como sistema de clasificación el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - USCS (Unified Soil Classification System), el cual se basa en la clasificación modificada de Casagrande; también se efectuaron análisis mineralógicos DRX y FRX con el fin de identificar principalmente la existencia de minerales arcillosos en los suelos evaluados.

La estimación de la deformabilidad se efectuó mediante el edómetro siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM D2435-04 preparando las muestras de los cuatro sondeos en las condiciones de humedad y densidad establecidas en la norma, en especímenes de 50 mm de

diámetro y 20 mm de altura. Cuando se pudieron desarrollar ensayos con mayor cantidad de tiempo se aumentaron los ciclos de carga y descarga con el fin de afinar los valores obtenidos para Cr.

La estimación de la resistencia se efectuó mediante tres tipos de análisis con el fin de tener un mayor espectro de los posibles valores en condiciones críticas de los suelos en estudio: ensayo de resistencia a la compresión en condiciones no consolidada no drenada – UU; ensayo de resistencia al corte en condición consolidado – drenado (CD), con el fin de obtener los esfuerzos efectivos; se realizaron también, cuatro ensayos de resistencia al corte en condición consolidado no drenado en equipo triaxial estático, siguiendo los procedimientos normativos establecidos en la norma ASTM D-2850.

Los resultados obtenidos tanto de la información primaria como secundaria, luego de depurados y verificados se analizaron, permitiendo establecer tendencias y correlaciones para identificar el comportamiento geomecánico esperado de los suelos cuyo análisis se presenta en el capítulo 6.

**CAPITULO 6**  
**ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

## **6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En el presente capítulo se van a exponer los análisis producto de los resultados obtenidos del muestreo y los ensayos de laboratorio realizados para esta investigación, así como de los ensayos de laboratorio revisados y filtrados de información secundaria, los cuales ya fueron comentados y presentados en el capítulo 5, esto con el fin de poder determinar las propiedades geomecánicas de los suelos identificados en las tres zonas piloto como materiales predominantemente arcillosos de diferente origen que cumplen las condiciones de comparabilidad establecidas en el capítulo previo.

Tal como se ha descrito en capítulos previos el análisis se concentró en las condiciones de deformación y resistencia de los materiales identificados relacionados con el colapso, la actividad, la expansión, análisis de los índices de compresión, hinchamiento, respuesta esfuerzo – deformación de los suelos identificados. Se usarán también la información de los diferentes ensayos para aplicar en algunos modelos constitutivos seleccionados para esta investigación, de los cuales se efectuó una descripción en el capítulo 4, con el fin de establecer cuál es el que se ajusta mejor respecto de la identificación del comportamiento prospectivo de los materiales bajo condiciones topográficas y físico – ambientales comparables con base en el origen geológico de los materiales.

Dada la importancia que presenta para esta investigación la identificación de la clasificación de los suelos a nivel geotécnico, la cual en forma convencional se realiza mediante ensayos físico – mecánicos, se usaron los resultados de los ensayos químicos para identificar la presencia y predominancia de minerales arcillosos en los diferentes suelos identificados, independientemente de su clasificación textural dada por la clasificación convencional de suelos USCS, usada a nivel nacional e internacional, resultados presentados en el capítulo. Enseguida se presenta una descripción del análisis de los resultados obtenidos.

### **6.1 Análisis estadístico de resultados de los ensayos de laboratorio de información primaria y secundaria existente por zona piloto para caracterización básica, resistencia y deformación**

Para el análisis de confiabilidad y con el objeto de construir modelos correlacionables de los suelos seleccionados en las tres zonas piloto, se tomaron las siguientes variables aleatorias para efectuar los análisis:

1. Contenido de humedad Natural.
2. Peso unitario del suelo.
3. Peso específico (Gravedad Específica)
4. Límites de consistencia (LL y LP)
5. Resistencia al corte no drenado,  $S_u$ .
6. Coeficientes de compresibilidad del suelo,  $C_r$  y  $C_c$ , o  $\lambda$ ,  $k$  y  $\gamma$  en el modelo Cam Clay.
7. Esfuerzo de preconsolidación del suelo  $\sigma'_p$ , o  $p_o$  en el modelo Camclay.
8. Angulo de fricción interna del suelo en el rango de normal consolidación, o  $M$  en el modelo Cam Clay.
9. Cohesión y fricción del suelo en el rango de sobreconsolidación  $C_e$  y  $-e$  o  $g$  y  $h$  en el modelo Cam Clay.

Con el fin de tener una herramienta de comparación unificada del comportamiento de los materiales, en las tres zonas piloto se evaluó el comportamiento de los suelos predominantemente arcillosos (suelos blandos) de diferente origen con base en los Modelos de Mohr Coulomb y Cam Clay, para evaluar la variación del comportamiento en función de la velocidad de deformación de los suelos; para lograr acoplar los modelos constitutivos con las propiedades índice de los suelos se utilizó el modelo francés, con base en lo propuesto por Raba Moyano & Caicedo (2012), modelo que relaciona el índice de consistencia del suelo con parámetros de resistencia y compresibilidad, tal como se expuso en el capítulo 4.

Enseguida se presentan las correlaciones que se efectuaron mediante análisis estadístico con base en los resultados presentados en el capítulo 5, para cada una de las zonas piloto en estudio.

1. Correlación entre el límite líquido y el índice de plasticidad
2. Correlación entre el límite líquido y el coeficiente de compresión
3. Relación entre el esfuerzo efectivo y el índice de Plasticidad
4. Relación entre el índice de consistencia y el índice de Plasticidad
5. Correlación entre el índice de plasticidad y el ángulo de fricción
6. Relación entre la resistencia al corte no drenado y el Índice de Plasticidad
7. Correlación entre el Índice de Plasticidad y el Índice de Viscosidad
8. Análisis de la Compresibilidad del suelo

#### **6.1.1 Clasificación de los suelos**

Como se ha descrito a lo largo de este documento para la clasificación de los suelos se usó el sistema de clasificación Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). Esta metodología parte de: granulometría y límites de Atterberg, por lo tanto, es un análisis predominantemente textural de los suelos y con base en su resultado el ingeniero toma decisiones respecto de otros ensayos que debe aplicar en los materiales y prevé el posible comportamiento de los suelos; los resultados de esta clasificación se presentaron en el capítulo 5 por zona piloto y se consolida enseguida la información producto de este análisis.



### 6.1.1.1 Zona Piloto 1 – Sabana municipio de Tabio

En la Tabla 6.1 se presentan en forma porcentual los resultados indicativos de la clasificación de los suelos que arroja el método de Casagrande.

*Tabla 6.1*

*Porcentaje de tipo de suelos de acuerdo con la clasificación SUCS en el municipio de Tabio- Sabana de Bogotá- Información primaria y secundaria*

<b>Nivel Litológico</b>	<b>MH (%)</b>	<b>SW (%)</b>	<b>CL (%)</b>	<b>CH (%)</b>	<b>ML (%)</b>	<b>CL-ML (%)</b>
Menor a 5,2	8	2	13	69	8	0
Mayor a 5,2	14	0	27	41	9	9

Como se observa de acuerdo con la clasificación obtenida tanto en el nivel A como en el nivel B, predominan los suelos arcillosos tipo CL, CH alcanzando en el nivel A un 82% del total, y en el nivel B un 68%. Es importante anotar que esta clasificación puede ser particularmente imprecisa principalmente en suelos con características entre arcillas y limos para los cuales se clasifica como arcilla para LL menores de 50 y limos para LL mayores de 50 (Moreno-Maroto et al., 2021). Los resultados de los ensayos DRX y FRX presentados en el capítulo 5 permiten establecer la presencia de minerales arcillosos en los suelos y algunos elementos predominantes asociados a filosilicatos. En este caso la clasificación producto del sistema USCS generó resultados consistentes con los minerales encontrados en las muestras analizadas; tal como lo muestran los análisis mineralógicos en la Zona 1 no se tiene presencia de minerales arcillosos expansivos tipo montmorillonita o illita, predomina la caolinita y la moscovita.

### 6.1.1.2 Zona piloto 2: Quindío- municipios Montenegro y Tebaida

Tal como en la zona piloto 1, en la Tabla 6.2 se presentan en forma porcentual los resultados indicativos de la clasificación de los suelos que arroja el método de Casagrande.

Como se observa de acuerdo con la clasificación obtenida tanto en el nivel A como en el nivel B, predominan los suelos limosos tipo ML, MH MH\_OH con un porcentaje total para el nivel litológico A 80% y para el nivel B de 79%. Los materiales clasificados como suelos arcillosos tipo CL,

CH solo alcanzan el 16% en el nivel A y un 4% en el nivel B. Los resultados de los ensayos DRX y FRX desarrollados para establecer la presencia de minerales arcillosos en los suelos y algunos elementos predominantes asociados a filosilicatos, presentados en el capítulo 5, muestran la presencia de minerales arcillosos tanto cristalinos como amorfos.

*Tabla 6.2  
Porcentaje de tipo de suelos de acuerdo con la clasificación USCS en los municipios de Montenegro, Tebaida y Armenia - Quindío- Información primaria y secundaria*

<b>Nivel</b>	<b>SM</b>	<b>ML</b>	<b>MH</b>	<b>CL</b>	<b>CL-ML</b>	<b>MH-OH</b>	<b>CH</b>	<b>CH-OH</b>	<b>ML-OL</b>
<b>Litológico</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Menor a 5,2	4	47	24	7	2	9	7	0	0
Mayor 5,2	7	24	22	0	0	33	4	7	2

En este caso la clasificación producto del sistema USCS no generó resultados consistentes con los minerales encontrados en las muestras analizadas; es decir de acuerdo a la clasificación USCS se tienen texturalmente en el área principalmente materiales tipo limo (ML-MH); sin embargo la presencia de minerales de arcilla predominantemente a lo largo del perfil, indica la existencia de suelos arcillosos que pueden presentar alta floculación que lleva a una clasificación que no corresponde con el material presente y clasifican como limos. Los altos porcentajes de limos obtenidos en los ensayos no se deben solamente al contenido de los granos de materiales primarios de tamaño limo, sino especialmente, a los agregados de tamaño grande formados por la agrupación o floculación de arcillas. Los ensayos DRX y FRX evidenciaron la presencia de caolinita, moscovita y esméctita; no se detectó montmorillonita.

### **6.1.1.3 Zona piloto 3: municipios de Barranquilla- Sector Loma Roja**

En la Tabla 6.3 se presentan en forma porcentual los resultados indicativos de la clasificación de los suelos que arroja el método de Casagrande.

*Tabla 6.3*  
*Porcentaje de tipo de suelos de acuerdo con la clasificación USCS en el sector Loma Roja- Municipio de Barranquilla- Información primaria y secundaria- Zona Piloto 3*

<b>Nivel Litológico</b>	<b>CH %</b>	<b>CL %</b>	<b>ML %</b>
Menor a 5,2	80	15	5
Mayor 5,2	69	22	9

Como se observa de acuerdo con la clasificación obtenida tanto en el nivel A como en el nivel B, predominan los suelos arcillosos tipo CH, CL con un porcentaje total para el nivel litológico A 95% y para el nivel B de 91%. Los resultados de los ensayos DRX y FTIR existentes para determinar la presencia de minerales arcillosos en los suelos y algunos elementos predominantes asociados a filosilicatos. Los ensayos FTIR y DRX evidenciaron la presencia de caolinita, montmorillonita, y micas (Illita/yo moscovita).

En este caso la clasificación producto del sistema USCS generó resultados consistentes con los minerales encontrados en las muestras analizadas. En todas las muestras analizadas mediante el ensayo DRX se identificó montmorillonita, sin embargo, la forma y amplitud de los picos que caracterizan este mineral, así como los patrones de difracción obtenidos luego de la calcinación del material indican la posible presencia de interestratificados tipo illita/montmorillonita, sin embargo, es difícil establecer su presencia por estar mezclados los materiales (Rodríguez, 2014).

### **6.1.2 Análisis de Comportamientos especiales de los suelos finos a partir de sus propiedades índice por zona piloto**

Las condiciones de fase se relacionan en forma directa con comportamientos especiales de los suelos tales como sensibilidad, colapsabilidad, expansión, dispersividad, desgaste, etc. Algunos suelos cuyo comportamiento no sólo está en relación directa con las sollicitaciones mecánicas, sino que también está controlado por factores externos al suelo, por ejemplo, factores químicos, variaciones ambientales como cambios en la temperatura, la precipitación, etc., inducen cambios en la humedad por ejemplo de los suelos; estos suelos son denominados suelos estructuralmente inestables o metaestables ; (Aitchison, 1973) presenta una adaptación de los principales tipos de suelos inestables o metaestables; según este autor, tanto el colapso como el hinchamiento pueden

ser considerados como procesos de inestabilidad estructural, debido a que inducen discontinuidades en el comportamiento deformacional del suelo al variar las condiciones ambientales como cambios de humedad, etc., sin que se modifiquen los estados tensionales exteriores. En general, estas características de los suelos definen comportamientos especiales, especialmente en los materiales arcillosos son de alta importancia. Sin embargo, es muy importante identificarlas en la práctica diaria de la ingeniería, en forma rápida, a partir de sus propiedades índice, esto con el fin de abordar posteriormente ensayos de laboratorio específicos para su identificación y análisis.

En primer lugar, la Actividad (A) de los suelos arcillosos asociada a la capacidad de las partículas para retener humedad, se puede evaluar a partir de los límites de consistencia del suelo; (Skempton, 1953) definió la actividad de un suelo fino como la relación entre el índice de plasticidad y el contenido de arcilla del suelo y está relacionada directamente con el contenido de ciertos minerales arcillosos en el mismo (Tabla 6.4 y 6.5). Igualmente, la actividad está relacionada directamente con la sensibilidad ( $S_t$ ) de los suelos finos arcillosos, la cual se refiere a las diferencias que presentan algunos suelos en resistencia en estado inalterado o en estado remoldeado (alterado) y se puede relacionar con el índice de liquidez, puesto que la máxima pérdida de resistencia se produce en un suelo floculado, su contenido de agua es muy grande comparado con el límite líquido determinado con suelo remoldeado (Lambe & Whitman, 1979).

*Tabla 6.4*  
*Actividad de los suelos finos arcillosos ( Skempton,1953)*

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>CALIFICACIÓN</b>
< 0.75	Baja
0.75 – 1.25	Media
1.25 – 7.20	Alta
> 7.20	Muy alta

Tabla 6.5

Relación entre la Actividad de los suelos finos arcillosos y el contenido de minerales arcillosos

ACTIVIDAD	MINERAL
0.33 – 0.46	Kaolinita
0.90	Illita
1.50	Montmorillonita (Ca)
7.20	Montmorillonita (Na)

Otro comportamiento de especial importancia en los suelos finos es la Colapsabilidad o disminución rápida de volumen del suelo producto del incremento de alguno de los factores como contenido de humedad ( $w$ ), grado de saturación ( $S_r$ ), tensión media actuante ( $\tau$ ), tensión de corte ( $\sigma$ ), presión de poros ( $\mu$ ) (Zur & Wiseman, 1973); se asocia con una pérdida súbita de resistencia al someter los materiales a saturación;(Reginatto, 1970) sugiere que un factor de alta importancia asociado al colapso es la interacción química entre el líquido que satura y la fracción arcillosa del suelo. En general estos suelos presentan una estructura macroporosa, granulometría predominantemente fina con predominio de limos y arcillas y una estructura inadecuadamente acomodada. En la Tabla 6.6 se presentan algunos acercamientos al cálculo del potencial de expansión a partir del conocimiento de los índices de consistencia.

Igualmente, propiedades como la expansividad pueden ser tenidos en cuenta a partir de indicadores sencillos que la relacionan con el índice de Plasticidad y la composición mineralógica del suelo. Los límites de Atterberg para predecir el potencial de expansión es la aproximación más usada en la práctica de la ingeniería. Raman en 1967 (Cano & Márquez, 2014) presentó el grado de expansión como función del Índice de Plasticidad y el índice de contracción (Tabla 6.7).

*Tabla 6.6*  
*Fórmulas para determinar el grado de colapso a partir de propiedades índice*

<b>Autor</b>	<b>Parámetro propuesto de Colapsabilidad</b>	<b>Criterio de Colapsabilidad</b>
		$K=0.5 - 0.75$ : Alto potencial de colapso.
Denisov (1964)	$K = \frac{eLL}{e}$	$K=1.0$ : Limoarcilloso que no presenta colapso. $K=1.5 - 2.0$ : Suelo que no presenta colapso
Abelev (1948)	$S_s = \frac{e}{eL + 1} \%$	$S_s > 2$ : Suelo Colapsable
Feda (1960)	$KL = \frac{W_o}{s_r} - \frac{LP}{IP}$	$KL > 0.85$ : Suelo Colapsable
Priklonski (1952)	$KD = \frac{(w_o - LP)}{IP}$	$KD < 0$ : Suelos con alto potencial de colapso $KD > 0.5$ : Suelo no presenta colapso $KD > 1.0$ : Suelos expansivos
Soviet Building Code (1962)	$L = \frac{e - eLL}{1 + e}$	$KD > -0.1$ : Suelos que presentan colapso

*Tabla 6.7*  
*Clasificación de suelos expansivos basados en el índice de Plasticidad y el índice de contracción*  
 (Cano & Márquez, 2014)

<b>Índice de Plasticidad</b>	<b>Índice de contracción</b>	<b>Potencial de expansión</b>
%	%	%
>10	>40	Muy alto
23-32	30-40	alto
12 -23	15-30	medio
< 12	< 15	bajo

Con base en lo indicado se evaluaron la Actividad (A), el potencial de Colapso y potencial de Expansión a partir de las propiedades índice de los suelos para las tres zonas piloto con base en la información consolidada presentada en el capítulo 5, dando los resultados que se presentan en las tablas 6.8 a 6.10.

Tal como se observa en la tabla 6.8 tanto la actividad como el potencial de colapso y potencial de expansión para la zona piloto 1 son bajos; los resultados de los análisis químicos son consistentes con los arrojados por las correlaciones, dando como mineral arcilloso predominante las caolinitas y moscovitas. Para la zona piloto 2 (tabla 6.9) se presenta un suelo en superficie con potencial de colapso que en profundidad disminuye, aumentando el potencial de expansión; en la zona piloto 2 tanto para el nivel litológico A y B se presenta una baja actividad con presencia predominante de caolinita principalmente y algún porcentaje de moscovita producto del análisis de minerales arcillosos efectuados a las muestras; en este caso es importante anotar que se identificaron minerales amorfos interestratificados de los cuales no se tiene una determinación exacta, sin embargo, ellos pueden dar algunas connotaciones de comportamiento especial en profundidad.

Para el caso de la zona piloto 3 (tabla 6.10) tanto en el nivel litológico A como en el nivel litológico B no se presenta potencial de colapso, pero sí potencial de expansión que coincide con el contenido de minerales tipo montmorillonita e illita tanto en el nivel A como en el B. Es importante anotar que la actividad calculada a partir de la ecuación de Skempton, no da una buena correlación para el caso de la zona piloto 3.

### 6.1.3 Análisis de la resistencia al corte de los suelos en condiciones drenadas y no drenadas por zona piloto

#### 6.1.3.1 Resistencia al corte no drenado – ensayo de compresión inconfiada

Dado que en las tres zonas piloto se efectuaron ensayos de compresión inconfiada que permite obtener la resistencia al corte no drenado, se desarrolló el análisis de la resistencia al corte con base en los datos de laboratorio. En primer lugar, se presenta en la Figura 6.1 la variación de  $S_u$  en profundidad por zona piloto a partir de los ensayos de laboratorio, siendo  $S_u = Q_u / 2$ .

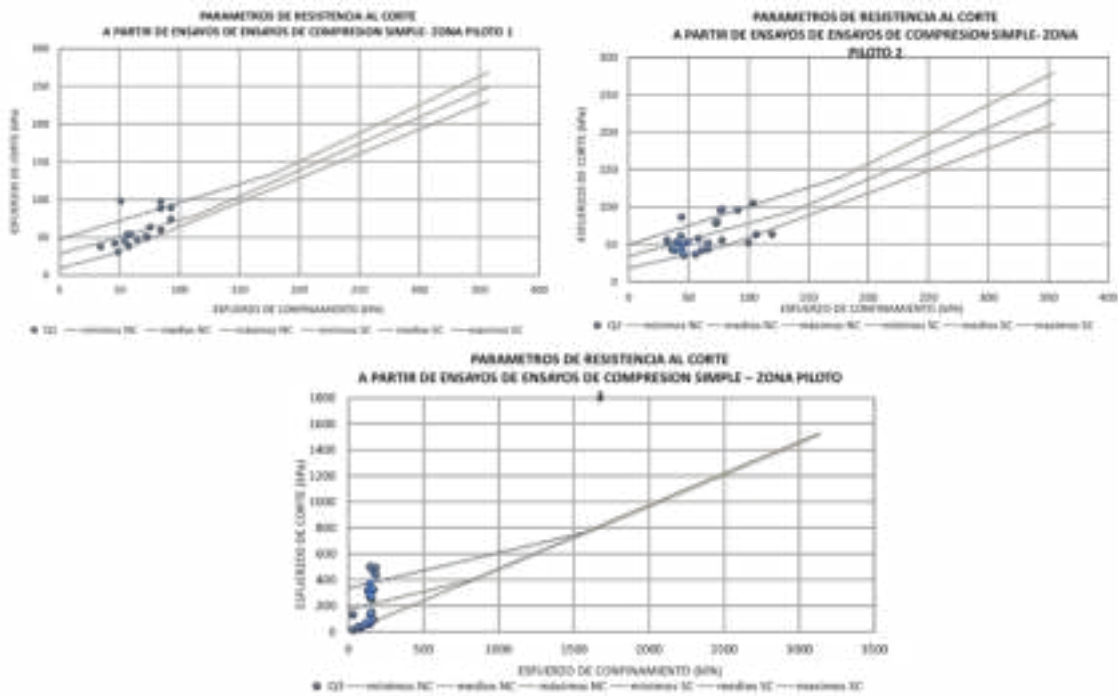


Figura 6.1 Variación de  $S_u$  (Laboratorio) con la profundidad para las tres zonas piloto



Tabla 6.8

Clasificación de colapsabilidad, actividad y grado de expansión de los suelos a partir de propiedades índice – Zona Piloto 1

ZONA PILOTO 1		COLAPSABILIDAD					GRADO EXPANSIÓN		ACTIVIDAD COLOIDAL	COMPOSICIÓN MINERALOGICA ENSAYO DRX	
Nivel Litológico	Profundidad (m)	DENISON - K	CLASIFICACIÓN DENISON	PRIKLOSNIKY - KD	CLASIFICACIÓN PRILOSMKY	U.R.S.S - L	CLASIFICACIÓN URSS	RAMAN	SKEMPTON	CLASIFICACIÓN	MINERALES ARCILLOSOS PRESENTES DE ACUERDO AL ENSAYO DRX
A	MENOR A 5,2	1,58	No presenta colapso	0,45	Suelos Expansivos	-0,24	No colapso	BAJO - MEDIO	0,29	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO	CAOLINITA ENTRE EL 17,5% Y 30,2% Y MOSCOVITA ENTRE EL 6,2% Y 9,3% . Minerales amorfos no diferenciados
B	MAYOR A 5,2	1,26	Suelo no Colapsable	0,72	No colapso	-0,10	No Colapsa	BAJO - MEDIO	0,16	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO	CAOLINITA ENTRE EL 46% y 72% Y MOSCOVITA ENTRE EL 18,3% y 22.1%

Tabla 6.9

Clasificación de colapsabilidad, actividad y grado de expansión de los suelos a partir de propiedades índice – Zona Piloto 2

ZONA PILOTO 2		COLAPSABILIDAD						GRADO EXPANSIÓN	ACTIVIDAD COLOIDAL	COMPOSICIÓN MINERALOGICA ENSAYO DRX	
Nivel Litológico	Profundidad (m)	DENISON - K	CLASIFICACIÓN DENISON	PRIKLOSNIKY - KD	CLASIFICACIÓN PRILOSMKY	U.R.S.S - L	CLASIFICACIÓN URSS	RAMAN	SKEMPTON	CLASIFICACIÓN	MINERALES ARCILLOSOS PRESENTES DE ACUERDO AL ENSAYO DRX
A	MENOR A 5,2	1,27	No colapso	0,58	No colapso	-0,19	Colapsa	BAJO	0,03	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO	CAOLINITA ENTRE EL 15 Y 18,6% Y MOSCOVITA ENTRE EL 8,7 Y 18,6%
B	MAYOR A 5,2	1,56	Suelo no Colapsable	2,21	Suelos Expansivos	-0,66	No Colapsa	BAJO	0,13	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO	CAOLINITA ENTRE EL 7 Y 22% Y MOSCOVITA ENTRE EL 7,3 Y 18,2%

Tabla 6.10

Clasificación de colapsabilidad, actividad y grado de expansión de los suelos a partir de propiedades índice – Zona Piloto 3

ZONA PILOTO 3		COLAPSABILIDAD				GRADO EXPANSIÓN		ACTIVIDAD COLOIDAL	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA ENSAYO DRX		
Nivel Litológico	Profundidad (m)	DENISON	CLASIFICACIÓN	PRIKLOSNGY	CLASIFICACIÓN	U.R.S.S	CLASIFICACIÓN	RAMAN	SKEMPTON	CLASIFICACIÓN	MINERALES ARCILLOSOS PRESENTES DE ACUERDO AL ENSAYO DRX
A	0,00 - 5,2 m	1,74	N.A.	0,32	Suelos no colapsables con tendencia a suelos expansivos	-0,39	No colapsa	ALTO - MUY ALTO	0,10	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO	Presencia de calcita, mica y montorillonita
C	Mayor a 5,2 m	2,23	Suelo no colapsable	-0,14	Suelos expansivos con tendencia al no colapso	-0,51	No colapsa	MEDIO - ALTO	0,12	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO	Presencia de calcita, mica y montorillonita

Los valores de resistencia al corte no drenado en Sabana y Quindío se encuentran entre 10 kPa hasta aproximadamente 80 KPa, siendo mayores para Quindío; sin embargo, en Barranquilla van desde 10 kPa y alcanzan en algunos casos hasta 900 kPa; esto se puede deber a que en el caso de Barranquilla los ensayos se efectuaron sobre las muestras mucho tiempo después de realizado el muestreo, lo que lleva a la pérdida de humedad y condiciones naturales de los materiales.

#### **6.1.3.2 Resistencia al corte drenado – ensayo de corte condición CD**

Se realizaron ensayos de corte en equipo de corte condición consolidado – drenado (CD), con el fin de obtener los esfuerzos efectivos. Tal como se describió en el capítulo 5, estos ensayos se realizaron a una velocidad de 0.008 mm /min con el fin de alcanzar las condiciones requeridas para suelos predominantemente arcillosos; las muestras se consolidaron con un tiempo mínimo de 24 horas garantizando la consolidación del espécimen para iniciar la etapa de corte. El ensayo se efectuó para condición pico y condición residual aplicando ciclos sucesivos de corte a velocidades entre 1.0 a 1.5 mm/min; el último ciclo de corte se realizó a la velocidad de corte realizada para el ensayo de resistencia pico, es decir 0.008 mm/min.

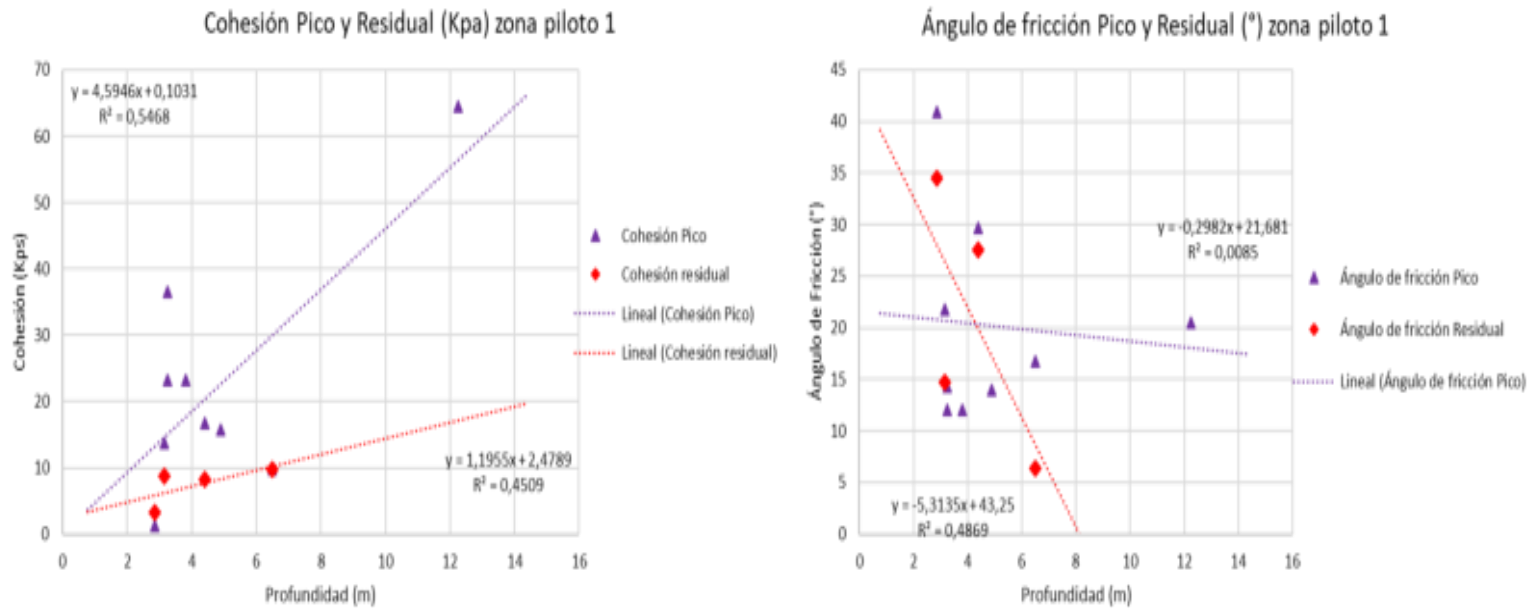


Figura 6.2 Variación de la cohesión pico y residual y la fricción pico y residual en condición CD (Laboratorio) con la profundidad para la zona piloto 1

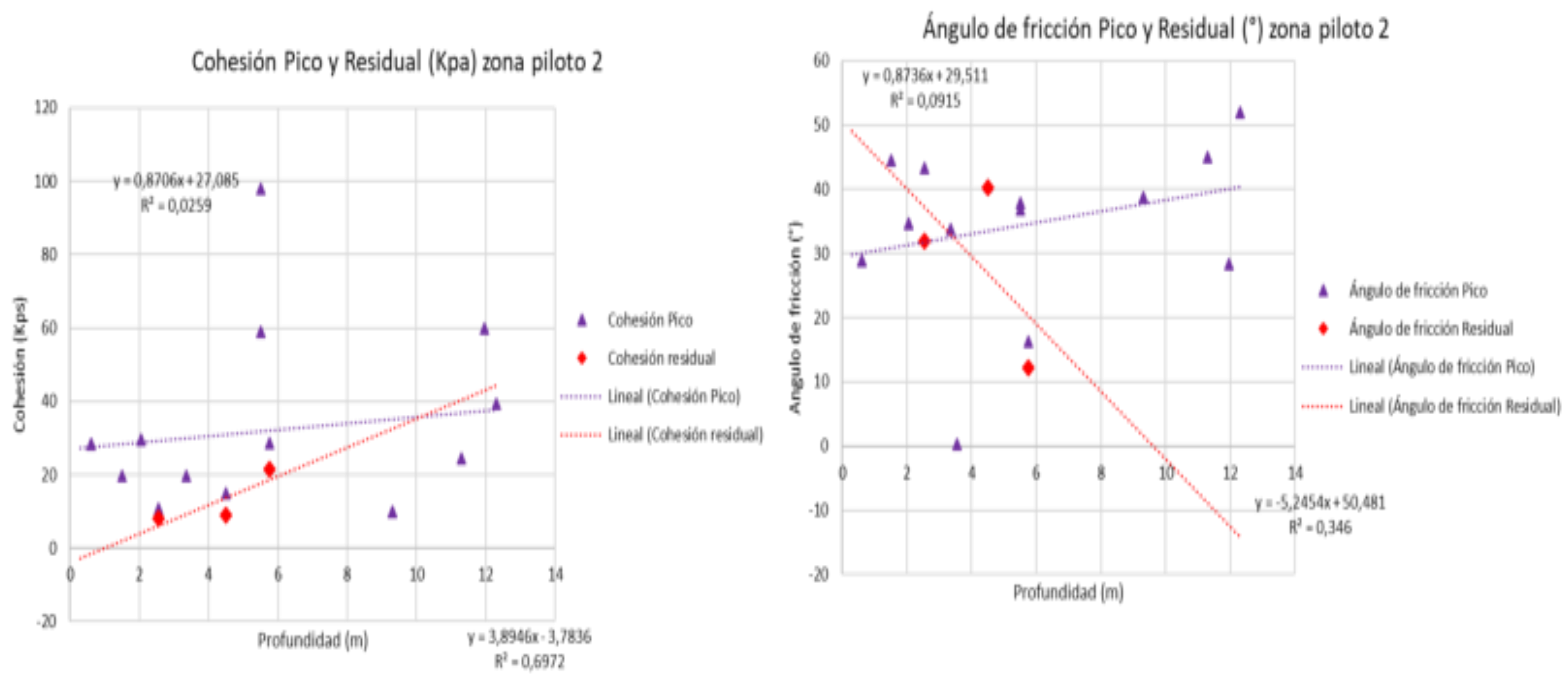


Figura 6.3 Variación de la cohesión pico y residual y la fricción pico y residual en condición CD (Laboratorio) con la profundidad para la zona piloto 2

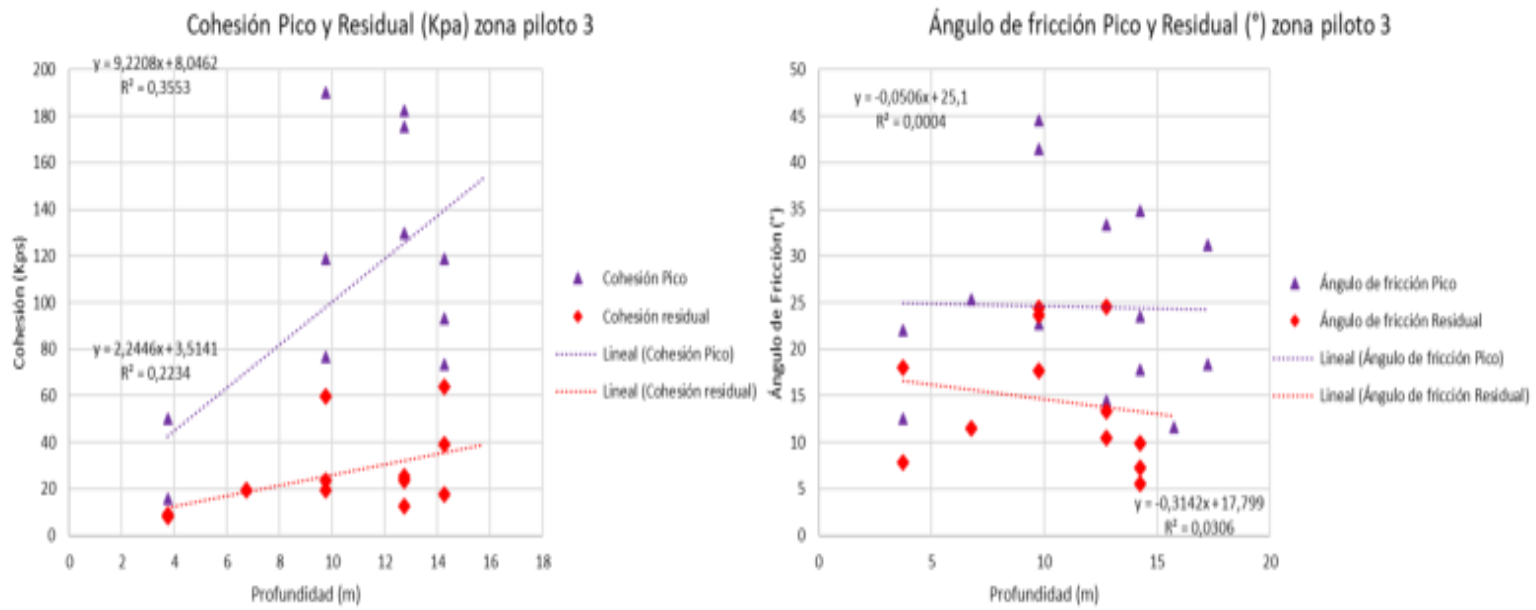


Figura 6.4 Variación de la cohesión pico y residual y la fricción pico y residual en condición CD (Laboratorio) con la profundidad para la zona piloto 3

En las tablas 6.11 a 6.13 se presentan los resultados de los valores medios de la resistencia al corte por nivel litológico en condición no consolidado no drenado UU (ensayo de compresión inconfínada) y en condición drenada CD (ensayo de corte).

**Tabla 6.11**  
Análisis estadístico resultados ensayos de resistencia al corte condición UU y condición CD  
Zona Piloto 1

Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	COMPRESION INCONFINADA				CORTE DIRECTO		
			HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	qu INCONFINADA (kσ/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA	COHESION (kPa)	ANGULO DE FRICCION Φ (°)
A	0,00 - 5,20	Media μ	78,00	287,01	136,89	68,92	7,65	17,06	26,68
		Desviación estándar σ	39,04	607,08	284,19	39,40	4,08	14,61	11,38
		COV	0,50	2,12	2,08	0,57	0,53	0,86	0,43
B	Mayor a 5,2 m	Media μ	31,30	16,38	12,71	32,21	8,65	37,15	14,55
		Desviación estándar σ	11,21	5,69	5,42	25,53	0,21	38,67	7,85
		COV	0,36	0,35	0,43	0,79	0,02	1,04	0,54

**Tabla 6.12**  
Análisis estadístico resultados ensayos de resistencia al corte condición UU y condición CD  
Zona Piloto 2

Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	COMPRESION INCONFINADA				CORTE DIRECTO		
			HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	qu INCONFINADA (kσ/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA	COHESION (kPa)	ANGULO DE FRICCION Φ (°)
A	0,00 - 5,20	Media μ	54,97	14,27	9,37	61,85	19,73	22,06	30,88
		Desviación estándar σ	16,40	1,37	1,89	23,64	17,70	6,88	16,14
		COV	0,30	0,10	0,20	0,38	0,90	0,31	0,52
B	Mayor a 5,2 m	Media μ	45,63	15,59	10,36	83,62	22,07	42,34	40,16
		Desviación estándar σ	10,69	1,03	0,15	30,60	17,95	32,62	7,39
		COV	0,23	0,07	0,01	0,37	0,81	0,77	0,18



Tabla 6.13

Análisis estadístico resultados ensayos de resistencia al corte condición UU y condición CD  
Zona Piloto 3

Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	COMPRESION INCONFINADA					CORTE DIRECTO	
			HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	qu INCONFINADA (kg/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA	COHESION (kPa)	ANGULO DE FRICCION $\Phi$ (°)
A	0,00 - 5,20	Media $\mu$	29,03	18,44	N.A.	91,20	3,14	32,85	17,31
		Desviacion estandar $\sigma$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	24,27	6,75
		COV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,74	0,39
B	Mayor a 5,2 m	Media $\mu$	21,89	20,31	N.A.	662,34	3,24	129,12	26,60
		Desviacion estandar $\sigma$	6,67	1,62	N.A.	609,94	1,50	156,50	13,50
		COV	0,30	0,08	N.A.	0,92	0,46	1,21	0,51

Para las tres zonas piloto el comportamiento de la cohesión tiene tendencia a aumentar en profundidad, siendo en los tres casos la cohesión residual más baja que la cohesión en condición pico con pendiente positiva, presentando la zona piloto 2 la pendiente más baja, nuevamente se resaltan los valores excepcionalmente altos en Su que presenta la zona 3, que tal como se explicó previamente se pueden deber al tiempo durante el cual las muestras estuvieron almacenadas previo a la ejecución del ensayo de compresión inconfiada que las llevó a pérdida de humedad.

En tanto que se tienen resultados bastante consistentes para la cohesión, los valores del ángulo de fricción pico y residual presentan comportamientos que muestran una tendencia a disminuir en profundidad en condición pico para las zonas 1 y 3 que presentan pendientes negativas, sin embargo para la zona piloto 2 el ángulo de fricción presenta un leve incremento con pendiente positiva para la condición pico, esto puede ser producto de la presencia de suelos con presencia de materiales granulares tipo limo pero con alto contenido de minerales arcillosos que revela los valores de cohesión que oscilan entre 20 y 40 kPa para la zona 2.

Algunos materiales tienden a exhibir un comportamiento de endurecimiento por deformación, mientras que algunos materiales litificados tienden a presentar un comportamiento

de ablandamiento por deformación observable en los valores del ángulo de fricción residual. En las figuras 6.5 a 6.7 se presentan las gráficas de esfuerzo cortante  $\tau$  versus el desplazamiento horizontal en condición pico y residual, típicos para cada una de las zonas. Para la zona piloto 1 se puede ver un comportamiento típicamente dúctil de ablandamiento por deformación en condición pico y residual, mientras que para los materiales de las zonas piloto 2 y 3 se presenta un comportamiento inicialmente frágil en condición pico, con un endurecimiento por deformación inicial en condición pico, que se convierte posteriormente en comportamiento dúctil en condición residual.

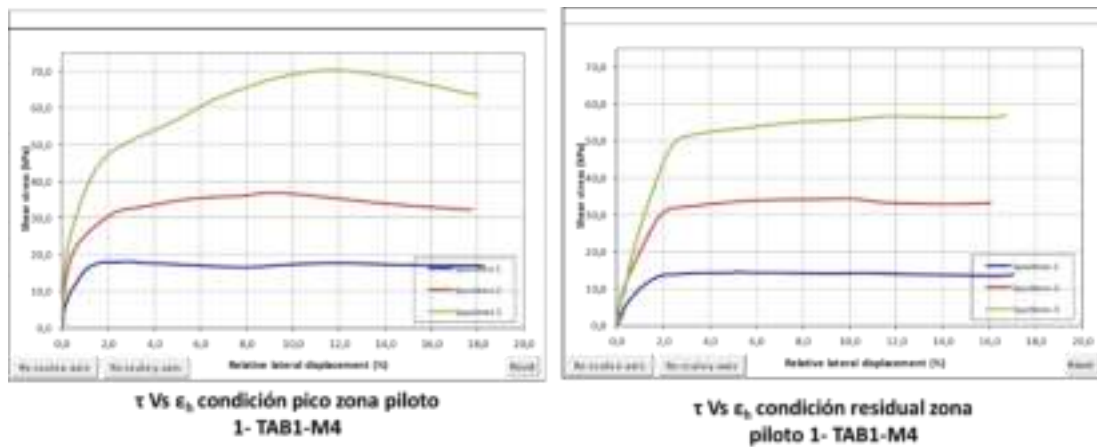


Figura 6.5 Variación típica del esfuerzo cortante  $\tau$  en condición pico y residual con la deformación horizontal para la zona piloto 1

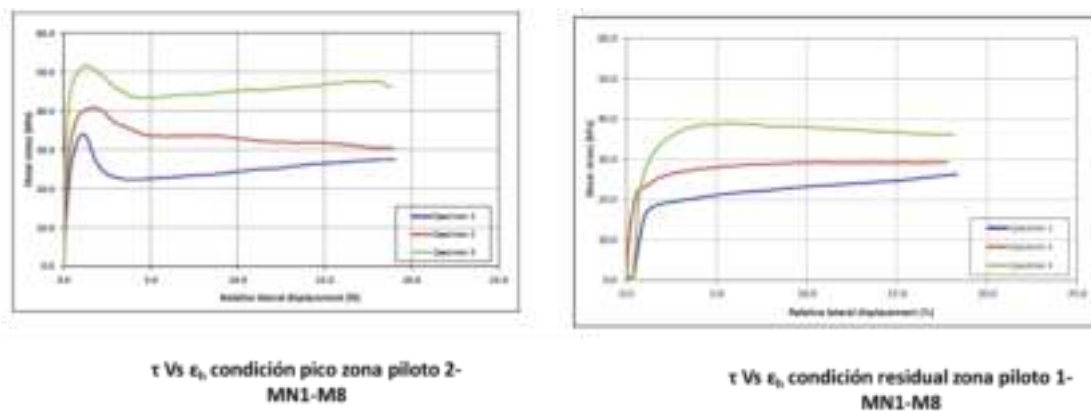


Figura 6.6 Variación típica del esfuerzo cortante  $\tau$  en condición pico y residual con la deformación horizontal para la zona piloto 2

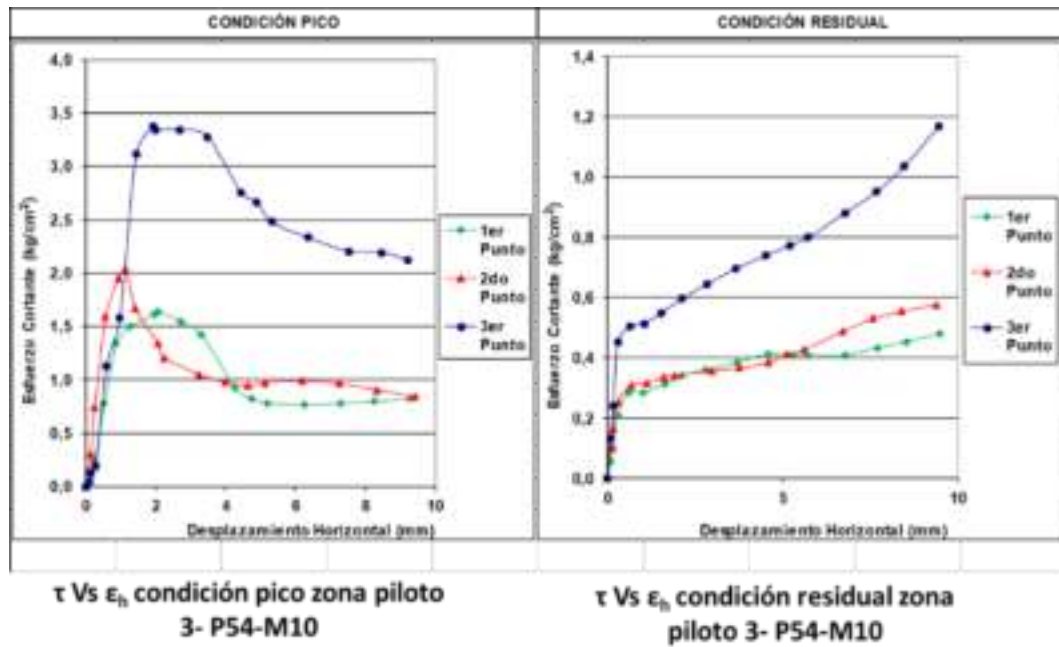


Figura 6.7 Variación típica del esfuerzo cortante  $\tau$  en condición pico y residual con la deformación horizontal para la zona piloto 3

### 6.1.3.3 Ensayos triaxiales

Los ensayos triaxiales se ajustaron al modelo de Duncan, encontrando una tendencia creciente del módulo de Corte inicial  $E$  con el esfuerzo de Confinamiento  $p$ . En el caso de la Formación sabana el Módulo inicial  $E_0/p'$  oscila entre 100 y 116; en el caso del Quindío esta relación  $E_0/p' = 1993$ . Los parámetros de resistencia resultantes acoplados a un modelo Cam Clay y a un modelo Mohr Coulomb son los siguientes:

Tabla 6.14  
Parámetros modelo Cam Clay Y Mohr Coulomb

MODELO CAM CLAY								MODELO MOHR COULOMB							
$\sigma_{1f}'$ kPa	$\sigma_{3f}'$ kPa	$p_f'$ kPa	$q_f$ kPa	$q_f/p_f'$	$g$ kPa	$h$	$M$	$s_f'$ kPa	$t_f$ kPa	$a_e$ kPa	$\alpha_e$ °	$\alpha_{NC}$ °	$c_e$ kPa	$\phi_e$ °	$\phi_{NC}$ °
108,41	42,90	64,74	65,51	1,012	9,70	0,959	0,987	75,65	32,75	4,11	22,5	23,0	4,51	24,5	25,1
212,35	76,50	121,78	135,85	1,116				144,42	67,92						
400,85	162,20	241,75	238,65	0,987				281,52	119,32						
146,20	51,00	82,73	95,20	1,151	12,16	1,002	1,051	98,60	47,60	5,21	23,2	24,1	5,77	25,4	26,6
243,70	90,10	141,30	153,60	1,087				166,90	76,80						
425,44	162,50	250,15	262,94	1,051				293,97	131,47						
167,78	-17,40	44,33	185,18	4,178	152,29	0,742	1,646	75,19	92,59	67,76	18,3	32,9	71,79	19,3	40,2
353,26	76,00	168,42	277,26	1,646				214,63	138,63						

#### 6.1.4 Análisis de la compresibilidad del suelo

Para analizar la compresibilidad del suelo, se analizó la relación existente entre el Coeficiente de compresión  $C_c$  y el Coeficiente de recompresión  $C_r$ , datos obtenidos a partir de los resultados de los ensayos de consolidación unidimensional. En la Figura 6.8 se presenta la gráfica de la variación de  $C_c$  y  $C_r$  en profundidad y en la Figura 6.25 se gráfica la correlación de  $C_c$  y  $C_r$  por zona piloto. A partir del análisis de esta correlación se obtiene la relación entre estas variables para cada una de las zonas piloto, la cual nos permitirá calcular posteriormente el módulo restringido del suelo  $D'$  (Raba Moyano & Caicedo, 2012) y el módulo no confinado  $E_s'$ , para finalmente obtener el módulo no drenado  $E_u$ , considerando una relación de Poisson y de 0.3. valor típico par materiales finos predominantemente arcillosos.

Tabla 6.15 Correlación entre  $C_r$  y  $C_c$  para las tres zonas piloto

ZONA DE ESTUDIO	Ecuación	Correlación
ZONA PILOTO 1	$C_r = C_c/42,19$	1
ZONA PILOTO 2	$C_r = C_c/26,81$	2
ZONA PILOTO 3	$C_r = C_c/8,12$	3

Como se observa de los resultados presentados en la tabla 6.15, para las tres zonas piloto se tiene una pendiente con tendencia positiva, siendo la pendiente para las zonas 1 y 2 relativamente similar, presentándose una diferencia importante con la pendiente de la zona piloto 3. Las zonas piloto 1 y 2 presentan coeficientes de recompresión bastante bajos y con una pendiente baja que indica que se tienen materiales con niveles de compresibilidad similares a lo largo del perfil aumentando progresivamente en profundidad; en el caso de Barranquilla se encuentra que la compresibilidad aumenta también en profundidad, pero el aumento en esta condición es más fuerte que en los casos anteriores, hecho que se ve fuertemente reflejado en la correlación que muestra el valor de  $C_r$  y  $C_c$  de la tabla 6.15, hecho que puede ser causado por la mayor sobreconsolidación que presentan estos materiales.

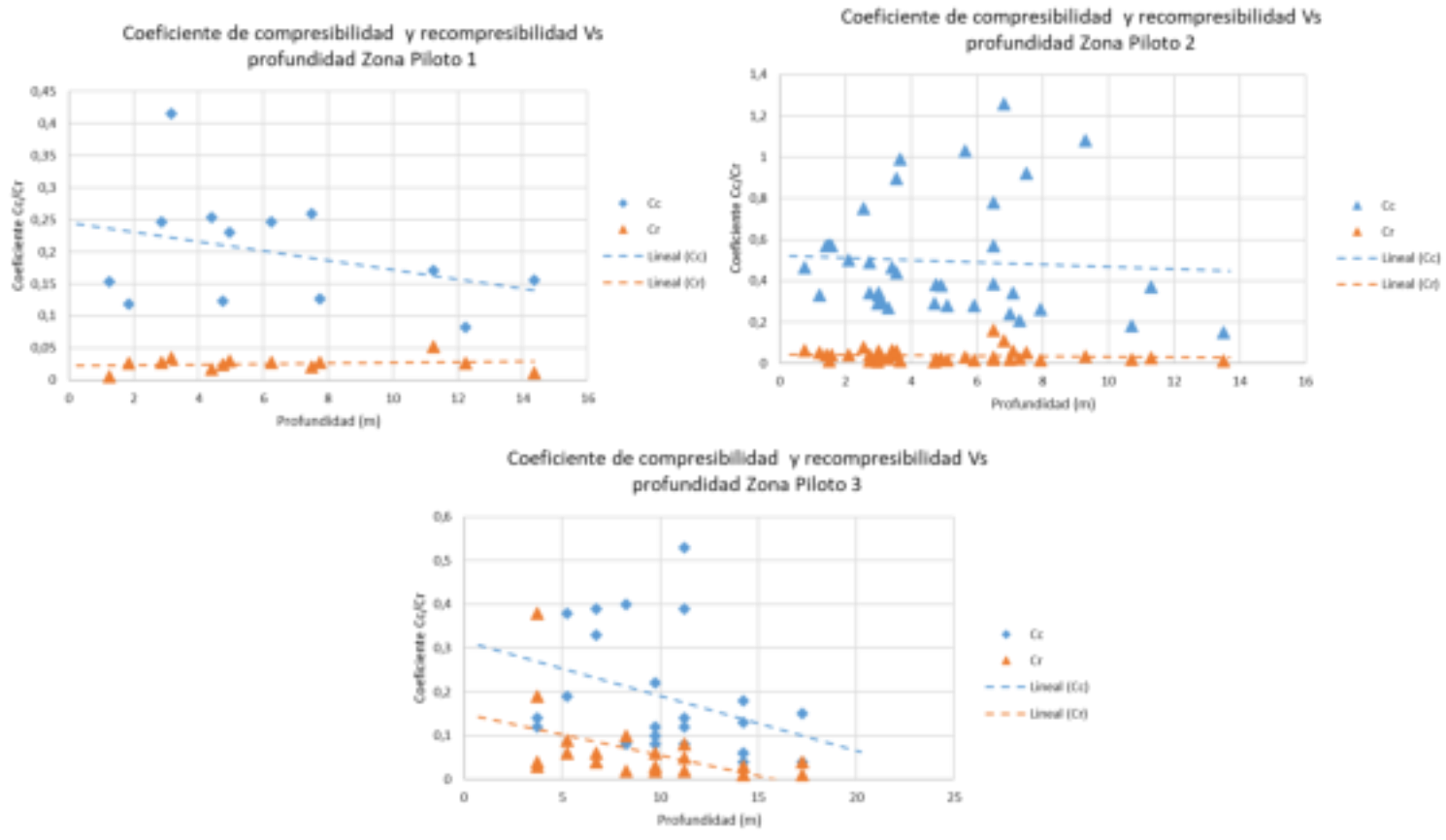


Figura 6.8 Variación de  $C_s$  y  $C_c$  a partir de datos de laboratorio con la profundidad por zona piloto

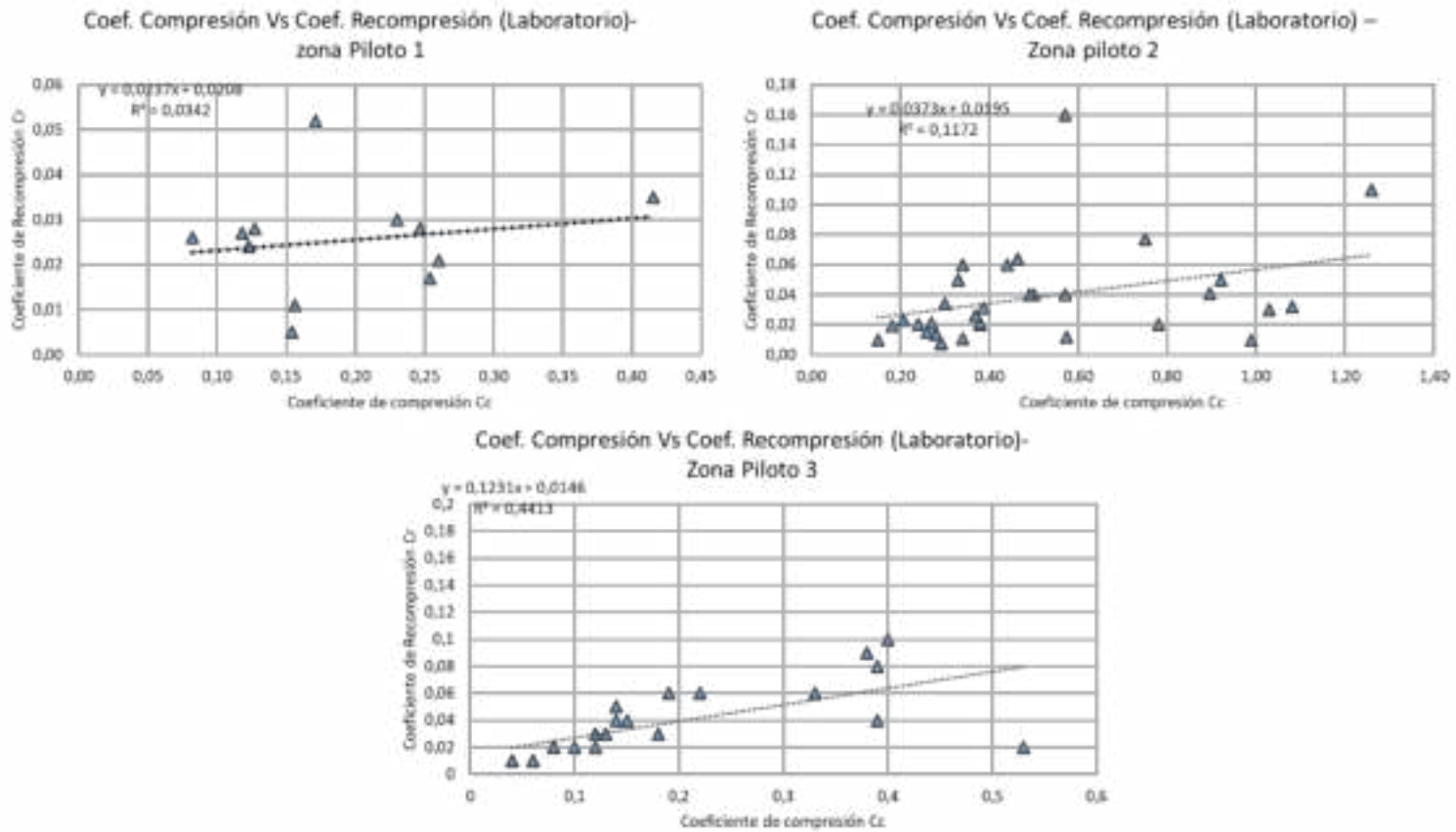


Figura 6.9 Relaciones obtenidas entre  $C_s$  y  $C_c$  a partir de datos de laboratorio por zona piloto.

### **6.1.5 Relación entre el esfuerzo efectivo y el Esfuerzo de Preconsolidación**

Con base en los valores de peso unitario se determinaron los esfuerzos efectivos y se compararon contra los esfuerzos de preconsolidación obtenidos de los ensayos de consolidación para las tres zonas piloto. Los resultados para las tres zonas piloto se presentan en la Figura 6.10 a 6.12, incluyendo la relación entre la relación de sobreconsolidación RSC en profundidad. Como se puede observar en las tres zonas piloto los suelos se presentan sobreconsolidados a lo largo de todo el perfil evaluado, sin embargo, se tiene una muy alta dispersión en la zona piloto 2; igualmente la zona piloto 3 presenta valores de sobre consolidación superiores a las zonas 1 y 2.

En general los suelos presentan una mayor sobreconsolidación en superficie, la cual se mantiene en profundidad entre 1 y 2; esto contrasta con lo obtenido del cálculo del índice de consistencia, que indica para las tres zonas piloto que la consistencia de los materiales aumenta en profundidad. Sin embargo, estos resultados muestran que los suelos en las tres zonas se encuentran en proceso de consolidación en los estratos inferiores habiendo alcanzado ya una sobreconsolidación en superficie.

### **6.2 Aplicación de modelos de caracterización geotécnica de los suelos para las zonas piloto**

Se presenta en este aparte, con base en los resultados del análisis de la información de laboratorio seleccionada y analizada, algunos modelos que pueden explicar en mejor forma las deformaciones plásticas y elásticas de los suelos, así como el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de cargas externas e internas por zona piloto, mediante procedimientos numéricos que relacionan los cambios de volumen y el esfuerzo cortante. El uso de modelos constitutivos se basa en la necesidad de analizar de una forma más cercana a la realidad y con fines prospectivos el comportamiento geomecánico de los suelos esperados bajo diferentes sollicitaciones de esfuerzos, tomando en cuenta las condiciones para las que fueron desarrollados o validados.



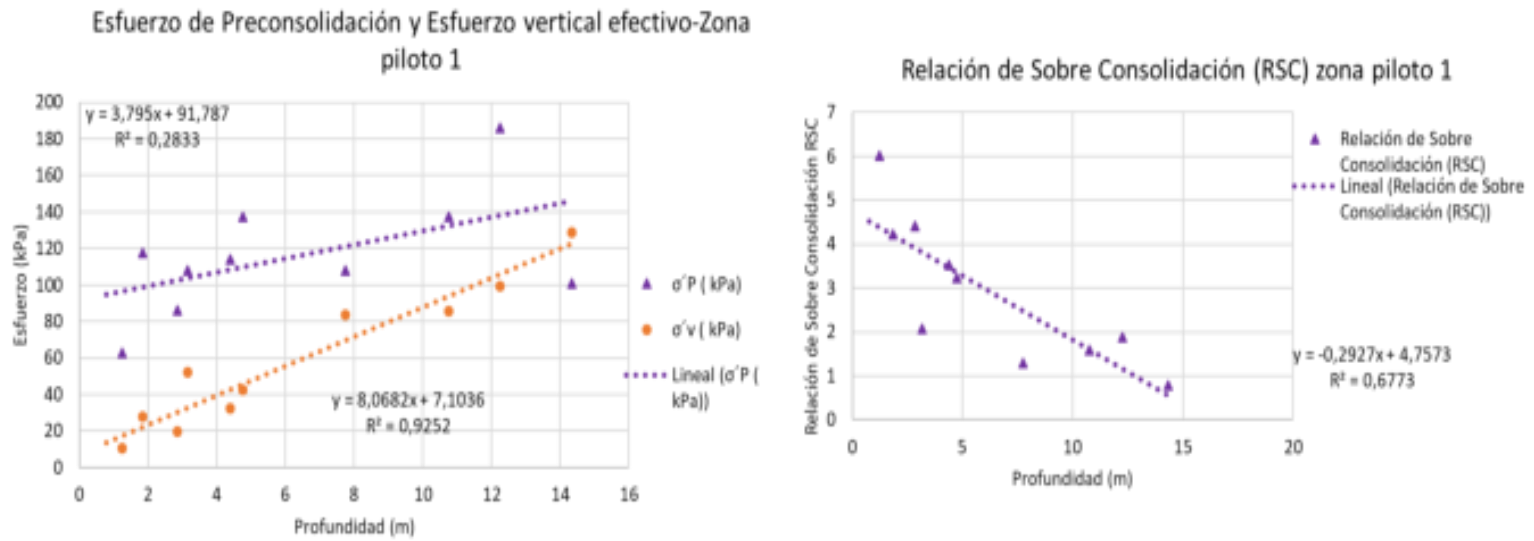


Figura 6.10 Variación del esfuerzo vertical efectivo, el esfuerzo de preconsolidación y la relación de sobreconsolidación RSC con la profundidad para la zona piloto 1

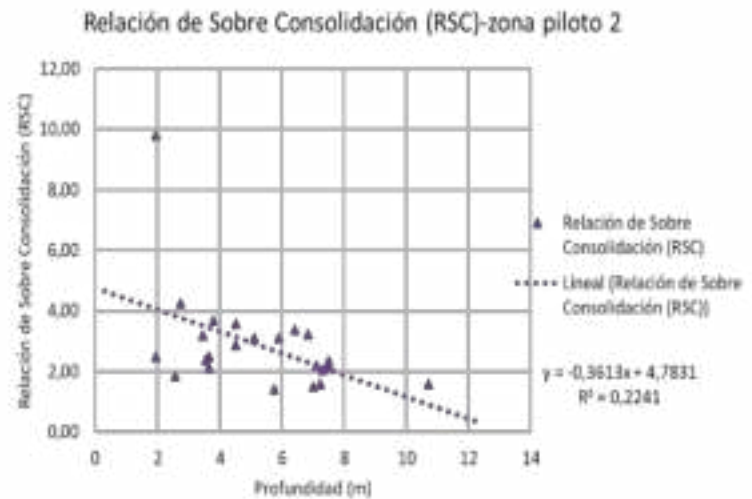
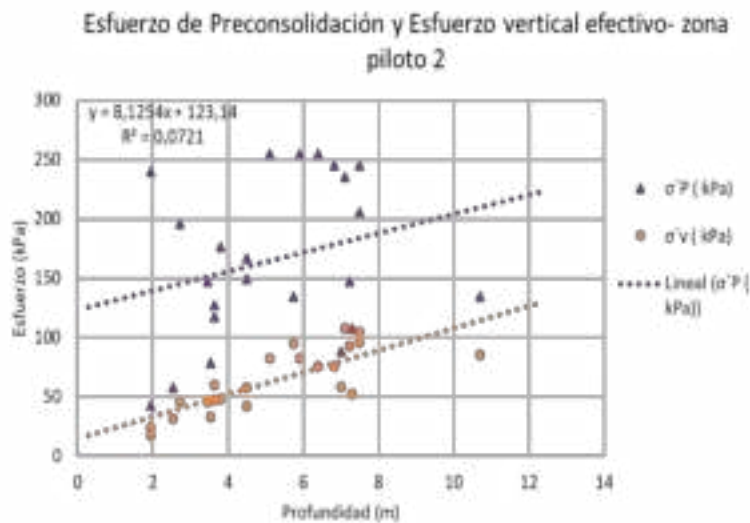


Figura 6.11 Variación del esfuerzo vertical efectivo , el esfuerzo de preconsolidación y la relación de sobreconsolidación RSC con la profundidad para la zona piloto 2

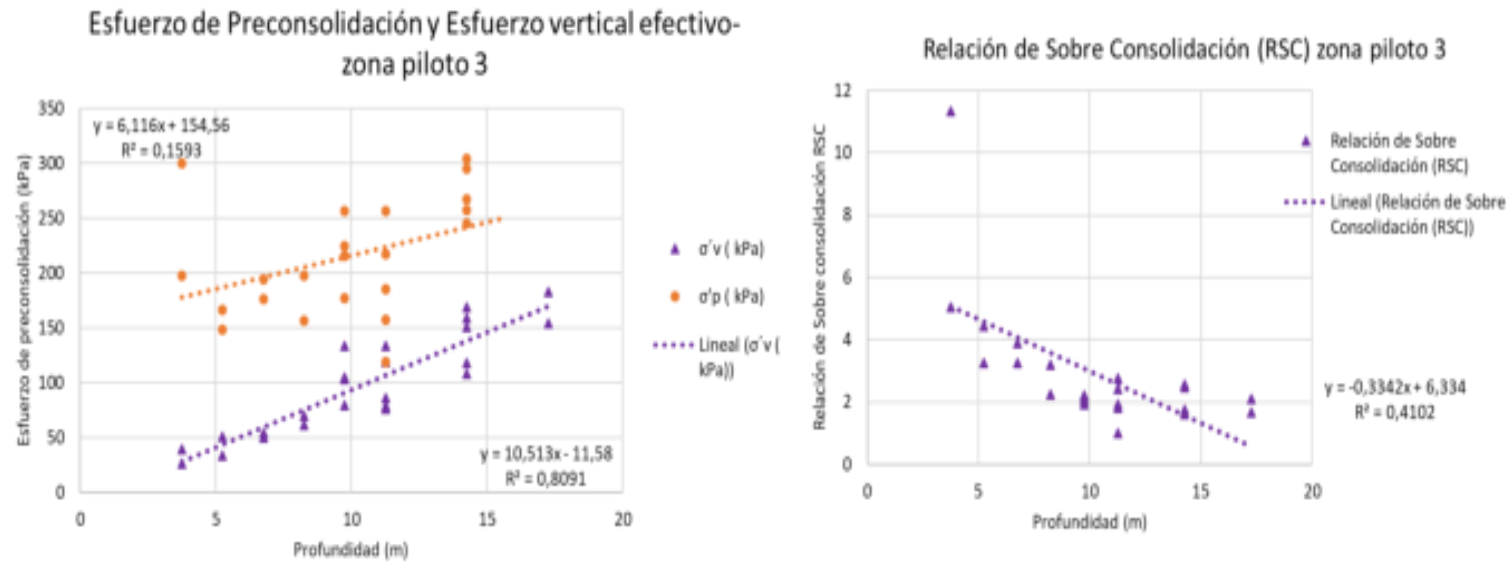


Figura 6.12 Variación del esfuerzo vertical efectivo , el esfuerzo de preconsolidación y la relación de sobreconsolidación RSC con la profundidad para la zona piloto 3

En la actualidad, existen modelos que representan las deformaciones plásticas y elásticas de los suelos de mejor forma, relacionando los cambios de volumen y el esfuerzo cortante, tal como se expuso en los capítulos introductorios de este documento; sin embargo, es importante resaltar que la facilidad de aplicación de los modelos también puede garantizar su uso más generalizado y una buena aplicación dentro de la práctica de la ingeniería.

Por los motivos expuestos, para nuestro objetivo de estudio, se aplicarán los siguientes modelos: Modelo Mohr Coulomb, que permite simular el comportamiento de diferentes tipos de materiales, desde granulares sueltos a finos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados en dos etapas: un modelo elástico y luego un modelo plástico; este modelo no representa la deformación progresiva de los suelos, asociada a elasticidad perfecta y plasticidad asociada a deformaciones irreversibles; el segundo, modelo CAMCLAY, siendo también un modelo elastoplástico es aplicable primordialmente a suelos predominantemente arcillosos blandos y no contempla la influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento del suelo, aspecto de especial importancia en suelos predominantemente arcillosos; como en el caso de Mohr Coulomb, su aplicación preferentemente es para materiales normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados. En tercer lugar, se aplicó el modelo Duncan Chang que considera condiciones no lineales e inelásticas con curvas de tendencia hiperbólica y relaciona el esfuerzo desviador con la deformación axial; la principal desventaja de este modelo es que, a diferencia de los modelos elastoplásticos, no puede distinguir entre los ciclos de carga y descarga (Huat et al., 2015).

Finalmente, y dado que en los trabajos diarios de ingeniería la mayor parte de información parte de las propiedades índice de los suelos, y con el fin de acoplar estos modelos constitutivos con estas propiedades se utilizó una adaptación al modelo francés (Biarez & Hicher, 1993) con las adaptaciones efectuadas por Raba Moyano & Caicedo (2012) que relaciona el índice de consistencia con diferentes parámetros de resistencia y deformación y permite representar en forma simplificada el comportamiento de suelos blandos arcillosos, analizando la varianza de las diferentes constantes de suelo en función de la variación de los parámetros de estado del suelo.

Estos modelos constitutivos proveen un marco cualitativo para facilitar análisis prospectivos que permitan depurar el conocimiento del comportamiento del suelo; además se pueden utilizar

con la aplicación de cálculos de elementos finitos, que los implementan diferentes programas computacionales especializados tales como PLAXIS, FLAC o MIDAS GTS NX; sin embargo, el modelo francés basa sus resultados en análisis estadísticos de la información de caracterización básica y la facilidad de su uso y aplicación, dado que no requiere herramientas computacionales muy exigentes, puede facilitar su uso en la práctica convencional de la ingeniería. En este caso para los tres primeros modelos se usó PLAXIS, mediante el uso de los parámetros obtenidos de los ensayos de laboratorio que se han descrito a lo largo de este documento: ensayos de clasificación, ensayos de corte directo, y ensayos de compresión triaxial (ensayos con los que se cuenta para propósitos del presente documento), ensayos de deformación, procediendo a la respectiva simulación mediante elementos finitos para comparar los resultados que se obtengan con los de laboratorio, y de esta manera validar el modelo que mejor se ajuste al estado tenso – deformacional de los suelos en evaluación para cada zona piloto y para el modelo francés se usaron herramientas de análisis estadístico convencional.

Se presentarán en primer lugar los resultados obtenidos con base en el modelo francés adaptado propuesto por Raba Moyano and Caicedo (2012) y en segundo lugar los resultados obtenidos con los modelos Mohr Coulomb, Cam Clay Duncan Chang.

### **6.2.1 Adaptación al modelo francés**

Esta adaptación se basa en el modelo propuesto por Biarez & Hicher, (1993)b. Las variables Este método plantea el uso de variables aleatorias tales como Contenido de humedad, Peso unitario del suelo, Peso específico de sólidos ( $G_s$ ), límites líquido y plástico (LL, LP), Resistencia al corte no drenado  $S_u$ , Coeficientes de compresibilidad del suelo,  $C_r$  y  $C_c$ , Esfuerzo de preconsolidación del suelo  $\sigma_p$ , Angulo de fricción interna del suelo  $\Phi$  en el rango de normal consolidación, Cohesión y fricción del suelo en el rango de sobreconsolidación. En este caso los suelos en las tres zonas piloto se encuentran sobreconsolidados, por lo cual se presenta una adaptación al modelo francés.

La correlación entre las diferentes variables aleatorias se basa en el trabajo efectuado por, Biarez & Hicher, (1993), en donde se establece un modelo de caracterización basado en el índice de plasticidad del suelo y su peso específico de sólidos; basados en este concepto en primera medida se determinan las relaciones básicas de las diferentes propiedades índice de los suelos para cada

una de las zonas piloto en estudio y a partir de esta información se establece el acercamiento de los resultados con los valores obtenidos en resistencia y deformación en laboratorio por zona piloto que definen el modelo mecánico de comportamiento del suelo.

Para la aplicación de este modelo se usaron correlaciones entre el Límite líquido y el Índice de plasticidad, el Límite líquido y el Coeficiente de compresión, el esfuerzo efectivo y el Índice de Plasticidad, Índice de consistencia y el Índice de Plasticidad, el Índice de Plasticidad y el Angulo de fricción, la resistencia al corte no drenado y el Índice de Plasticidad. Se presentan enseguida los resultados obtenidos para las zonas piloto mediante un análisis comparativo.

#### **6.2.1.1 Correlación entre el Límite líquido y el Índice de plasticidad**

El contenido de humedad y el índice de consistencia presentan una relación que se puede entender a partir de los límites de consistencia, ya que ellos representan la capacidad de retención de agua dentro de la estructura del suelo; estos son factores de alta importancia en el estudio del comportamiento de suelos plásticos predominantemente arcillosos; el modelo francés permite relacionar de una manera física estos parámetros índices con las propiedades físico -mecánicas de los suelos. En las Figuras 6.13 y 6.14 se presentan las correlaciones estadísticas entre el límite líquido LL y el índice de Plasticidad IP para las tres zonas piloto.

En la Tabla 6.16 se presentan las correlaciones encontradas para las tres zonas piloto entre el LL (límite líquido) y el IP (índice de plasticidad).

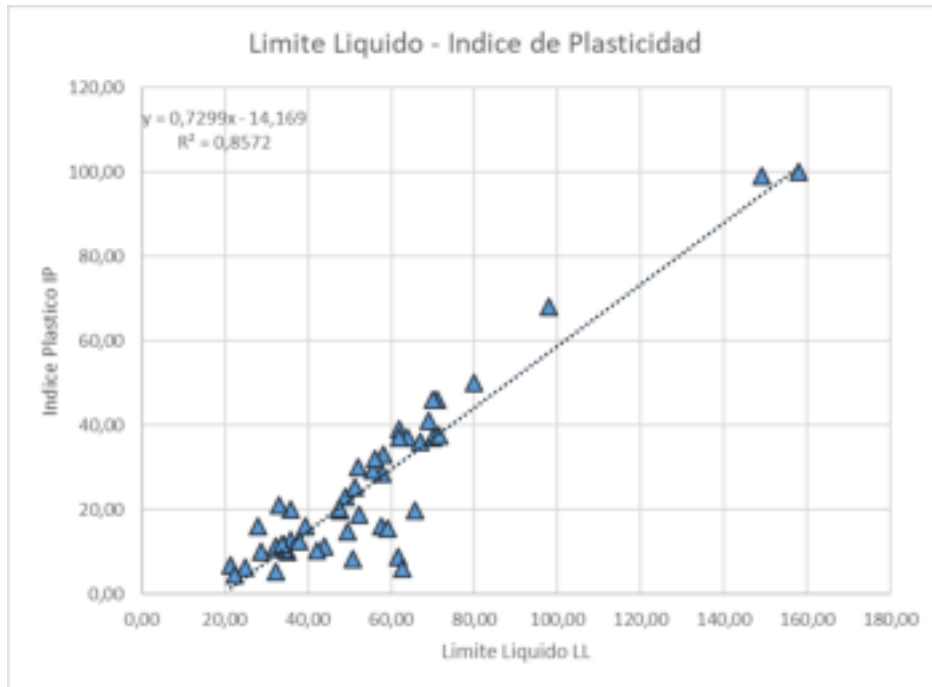


Figura 6.13 Variación del Límite Líquido contra el Índice Plástico para la zona 1: Sabana de Bogotá- municipio de Tabio

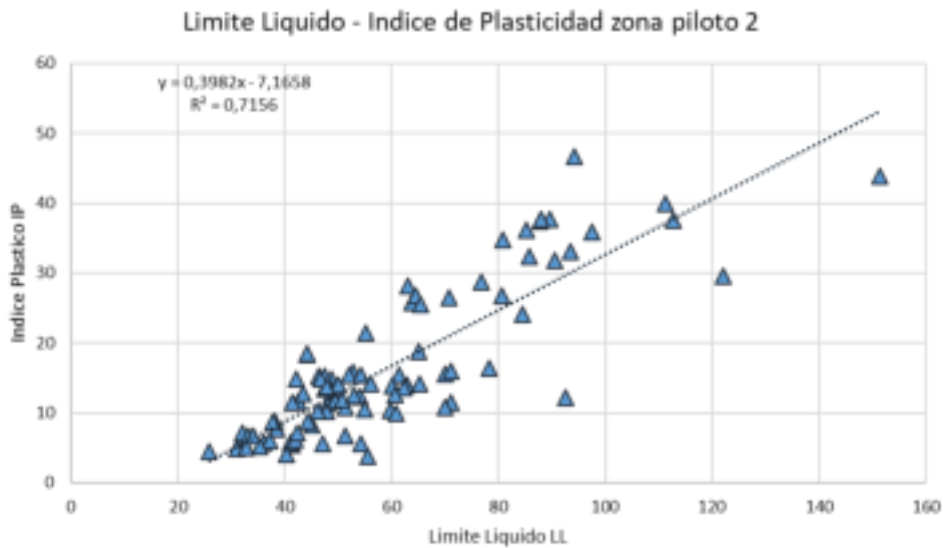


Figura 6.14 Variación del Límite Líquido contra el Índice Plástico para la zona 2: Quindío- municipios de Montenegro, Tebaida y Armenia

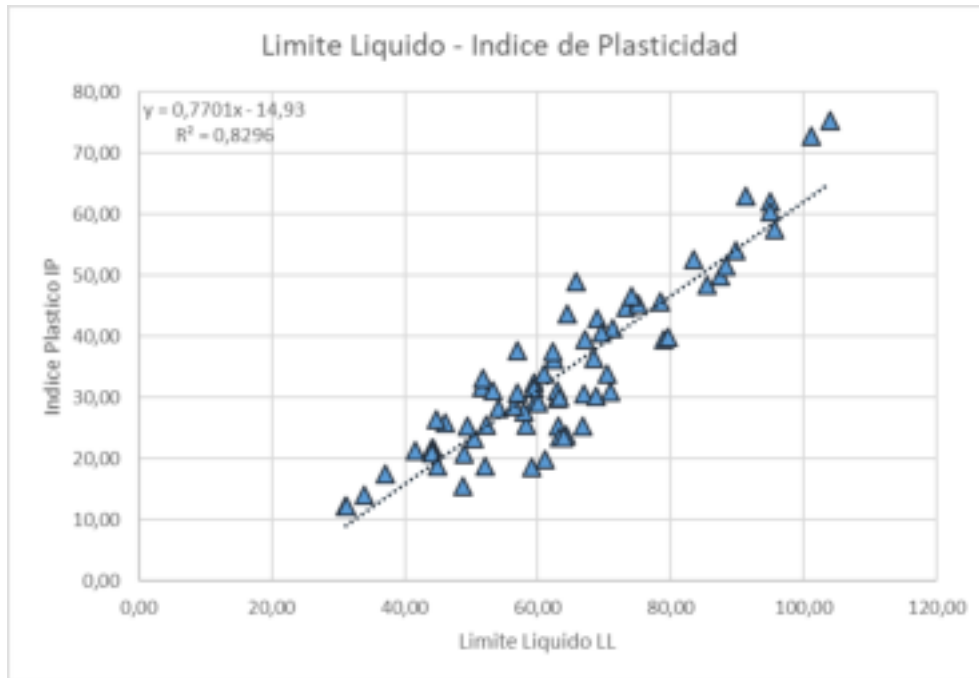


Figura 6.15 Variación del Límite Líquido contra el Índice Plástico para la zona 3: Municipio de Barranquilla – Sector de Loma Roja

Tabla 6.16 Correlación entre el Límite Líquido y el índice de Plasticidad para las tres zonas piloto

Resultado	Ecuación	Correlación R
Zona 1	IP = 0,729 (LL-19,412)	0,926
Zona 2	IP = 0,398 (LL-18,004)	0,846
Zona 3	IP = 0,77 (LL-19,38)	0,910

Es bastante importante observar que la zona 2, presenta una diferencia bastante importante de la ecuación final resultante, respecto de las zonas 1 y 3, presentando también una correlación un tanto más baja.



### 6.2.1.2 Relación entre el Índice de consistencia $I_c$ y el índice de Plasticidad

El índice de consistencia es un indicativo del grado de consistencia del suelo y relaciona el grado de humedad del suelo respecto de los límites. (Raba Moyano & Caicedo, 2012) plantean la siguiente relación entre el índice de consistencia y el índice de plasticidad:

$$I_c = \frac{LL - w_n}{I_p} \quad (6.1)$$

Con base en lo anterior se observa que a medida que la humedad es cercana al límite líquido, el  $I_c$  es cercano a cero, siendo el grado de consistencia del suelo bajo presentado el suelo un comportamiento plástico que se encuentra cerca del umbral de un estado fluido, por lo tanto, la resistencia al corte es muy baja. De otra parte, si la humedad es cercana al límite plástico, el  $I_c$  tiende a 1 y el suelo presenta alta consistencia presentado un estado entre plástico a semisólido; en general el límite de contracción es un valor que se puede definir como el límite superior del  $I_c$ . Ahora, es importante anotar, que, en la ejecución generalizada de los trabajos de ingeniería, en muchas ocasiones se puede perder la humedad natural y, por lo tanto, los resultados de este índice pueden estar alejados de la realidad, dado que no corresponden a la humedad natural de los suelos, hecho que no siempre es conocido por los ingenieros que deben interpretar los resultados a la luz de la caracterización básica de los suelos. En la Figura 6.16 se presenta la variación del índice de consistencia con el índice de plasticidad para las tres zonas piloto y en la Tabla 6.17 las correlaciones obtenidas.

Igualmente, en las Figuras 6.17 y 6.18 se puede ver la variación del  $I_c$  con la profundidad y con el límite Líquido para las tres zonas piloto. En las tres zonas se tiene un incremento del índice con la profundidad, hecho soportado en la sobreconsolidación que presentan los materiales en las tres zonas de estudio; sin embargo, al analizar la variación del  $I_c$  con el Límite Líquido, se observa que los resultados que arrojan las zonas 1 y 3 son consistentes con lo observado de los resultados de resistencia y deformación de estos materiales, los cuales muestran un ablandamiento al aumentar el Límite Líquido, hecho que da un resultado anómalo en la zona 2, observándose que la consistencia aumenta al aumentar el límite líquido.

Es importante observar que en las tres zonas piloto los índices de consistencia tienen una pendiente positiva que muestra suelos de alta consistencia a lo largo de toda la profundidad; estos resultados muestran la existencia de materiales más blandos en la zona piloto 1, aunque en los tres casos los suelos se encuentran sobreconsolidados, presentando un mayor grado de consolidación en superficie, indicador claro de que en los tres casos los materiales se encuentran en profundidad en proceso de consolidación.

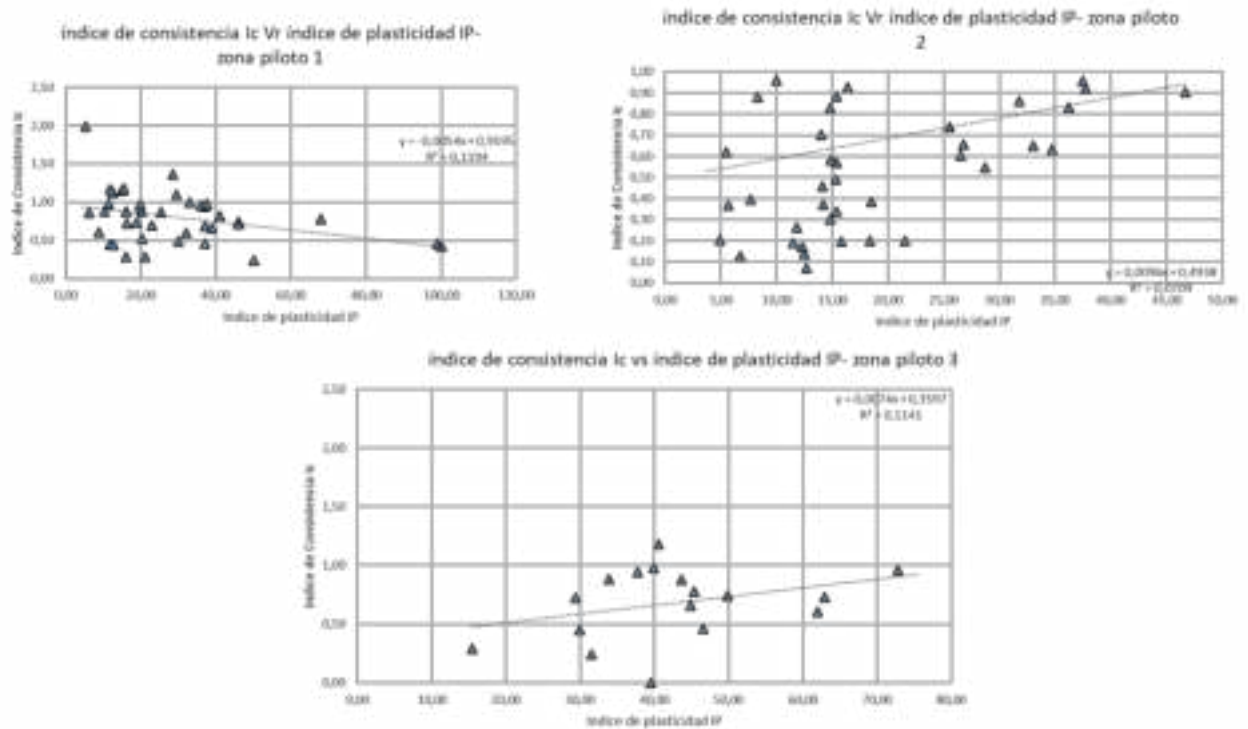


Figura 6.16 Variación del Índice de consistencia  $I_c$  con el Índice Plástico  $I_p$  por zona piloto

Tabla 6.17  
Correlación entre el Índice de consistencia y el índice de Plasticidad para las tres zonas piloto

Zona de estudio	Ecuación	Correlación
ZONA PILOTO 1	$I_c = -0,0054(IP + 177,68)$	0,3454
ZONA PILOTO 2	$I_c = + 0,0096(IP + 51,43)$	0,2662
ZONA PILOTO 3	$I_c = +0,0074(IP + 48,61)$	0,3377



Figura 6.17 Variación del Índice de consistencia  $I_c$  con la profundidad por zona piloto



Figura 6.18 Variación del Índice de consistencia  $I_c$  con el Límite Plástico por zona piloto

### 6.2.1.3 Correlación entre el límite Líquido y el Coeficiente de Compresión

Esta correlación permite establecer la relación entre el límite líquido y el coeficiente de compresibilidad  $C_c$  del suelo, obtenidos de los ensayos de consolidación; estas correlaciones parten de las investigaciones efectuadas por Terzaghi & Peck, (1948), donde diferencia el comportamiento de arcillas inalteradas y remoldeadas; se han desarrollado nuevos trabajos como los desarrollados en Chicago, Brasilia, y San Pablo entre otros (Das, 1983), en Colombia por Raba y Caicedo. Con base

en la correlación entre el Límite Líquido y el índice de Plasticidad previamente presentado se obtiene la siguiente expresión para el coeficiente de compresión (Raba Moyano & Caicedo, 2012)

$$C_c = \frac{IP}{K_c} \quad (6.2)$$

En donde  $K_c$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$K_c = \frac{100 * \log\left(\frac{1}{0.0065}\right)}{G_s} \quad (6.3)$$

Como resultado del análisis estadístico de la información se presentan las Figuras 6.19 a 6.21 para las tres zonas piloto y en la tabla 6.18 los resultados estadísticos del análisis; se observan los resultados obtenidos para  $C_c$  de la correlación con  $IP$  y los valores obtenidos de laboratorio de los ensayos de compresibilidad.

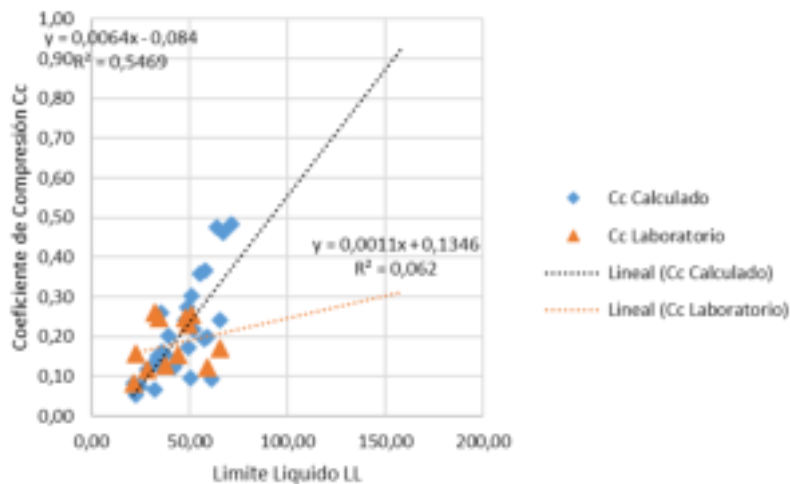


Figura 6.19 Correlación entre el Límite Líquido y el Índice de compresión  $C_c$  zona piloto 1

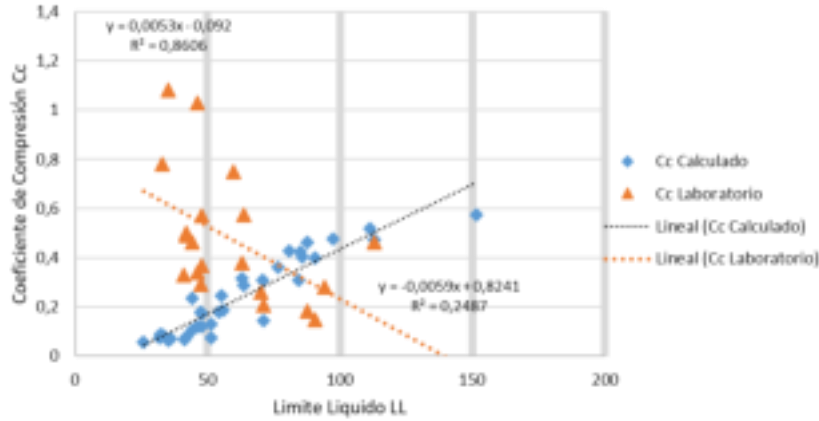


Figura 6.20 Correlación entre el Límite Líquido y el Índice de compresión Cc zona piloto 2

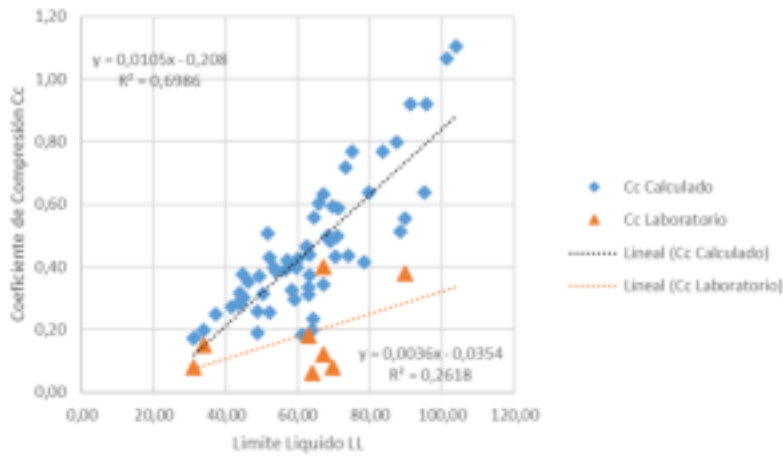


Figura 6.21 Correlación entre el Límite Líquido y el Índice de compresión Cc zona piloto 3

Tabla 6.18

Correlación entre el Coeficiente de Compresibilidad y el Límite Líquido para las tres zonas piloto

ZONA DE ESTUDIO	A partir correlación Cc =IP/Kc		A partir datos laboratorio	
	Cc =IP/Kc	Correlación r	Cc	Correlación r
ZONA PILOTO 1	Cc= 0,0064(LL-13,13)	0,740	Cc=0,0011(LL-122,37)	0,249
ZONA PILOTO 2	Cc= 0,0053(LL-17,35)	0,928	Cc= -,0059(LL+139,67)	0,079
ZONA PILOTO 3	Cc = 0,0105(LL-19,81)	0,836	Cc= 0,0036(LL-9,83)	0,512

Como se puede observar se obtienen buenas correlaciones para las tres zonas mediante el cálculo del coeficiente de compresibilidad a partir de las correlaciones con el IP; sin embargo, no es

posible obtener una muy buena correlación entre estas dos variables para los resultados del ensayo producto del laboratorio mediante ensayos de compresibilidad, hecho especialmente notorio para la zona piloto 2, materiales de origen volcánico; una posible explicación es que las muestras obtenidas en la zona 2 son especialmente sensibles a la manipulación y alteración por el secado, lo cual genera una muy alta dispersión en los resultados asociados a deformación.

Comparando los resultados obtenidos con los de otras partes del mundo, se encuentra que la pendiente de la línea de compresión se mantiene en rangos próximos para las zonas piloto 1 y 2, tanto para la obtenida a partir de correlaciones como la obtenida de ensayos de laboratorio; sin embargo, el cambio en pendiente es apreciable para la zona piloto 3 en ambos casos.

#### **6.2.1.4 Correlación entre el Índice de Plasticidad y el Angulo de fricción**

Se determinaron los ángulos de fricción a partir de ensayos de resistencia al corte drenados en condición pico y residual y se dibujaron en gráficas en donde se presenta el ángulo en condición pico y en condición residual. Para determinar la variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad se efectuó la comparación de los datos de resistencia de los ensayos de corte con el valor correspondiente del índice de plasticidad, tanto para la condición pico como residual y se compararon con los resultados obtenidos por Kenney en 1959 y Olson en 1974 (G441, 2004) que establece una línea de tendencia con base en el índice de plasticidad. En la Figura 6.22 se presenta los resultados de este análisis, con base en la cual y en la tendencia analizada se presenta en la tabla 6.19 las ecuaciones sugeridas para el análisis de la variación del ángulo de fricción con el índice de plasticidad en las tres zonas piloto usando la línea de tendencia de las muestras en condición pico y residual.

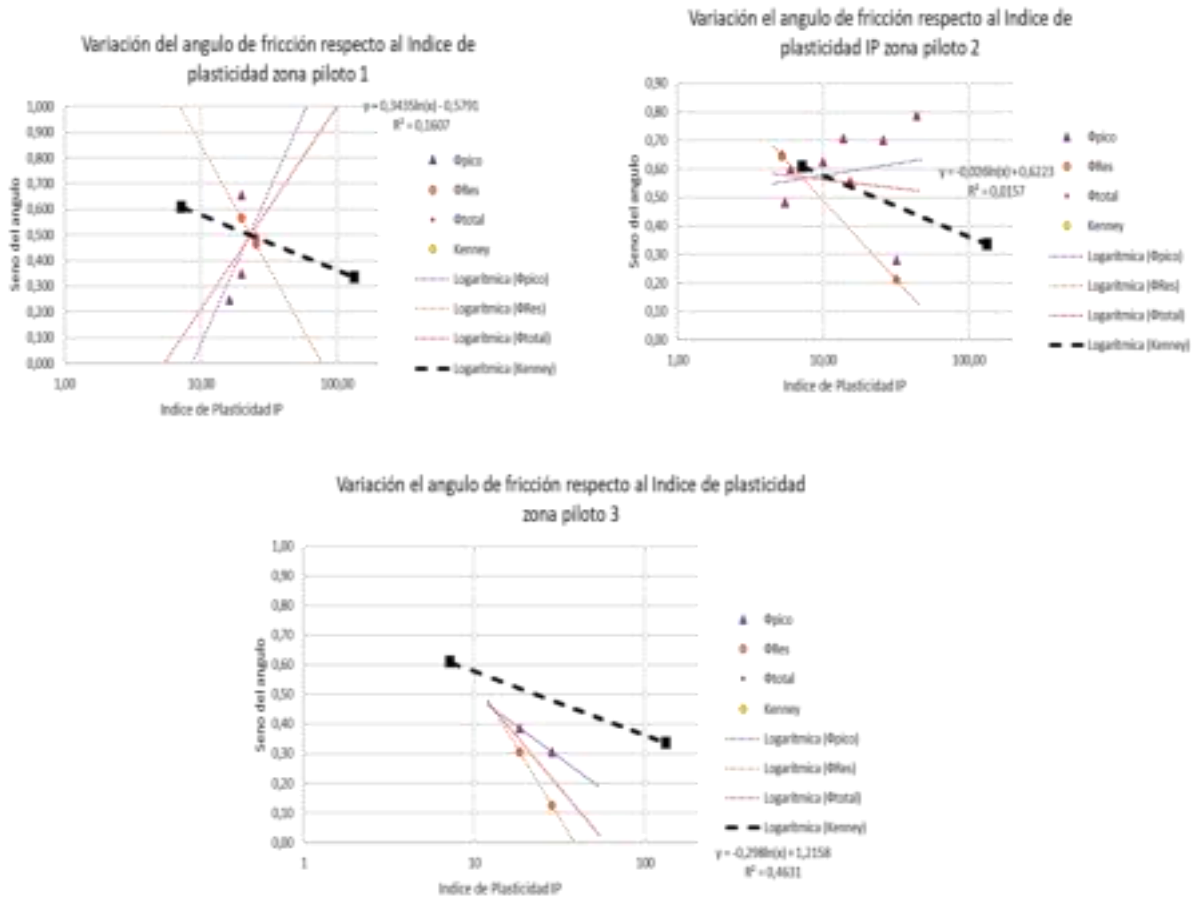


Figura 6.22 Variación del ángulo de fricción con el Índice de plasticidad

Tabla 6.19  
Correlación entre el Sen  $\Phi$  y el índice de Plasticidad para las tres zonas piloto

ZONA DE ESTUDIO	Ecuación	No
ZONA PILOTO 1	$\text{sen}\Phi = 0,3435\ln(\text{IP}) - 1,68$	1
ZONA PILOTO 2	$\text{sen}\Phi = -0,026 \ln(\text{IP}) + 23,93$	2
ZONA PILOTO 3	$\text{sen}\Phi = -0,298\ln(\text{IP}) + 4,07$	3

Se observa que las zonas piloto 1, 2 y 3 se presenta una tendencia en el comportamiento en condición residual similar que se aproxima un poco a la línea de tendencia de Kenny, en donde se tiene una reducción de la resistencia al corte a medida que aumenta su plasticidad; sin embargo en condición pico las muestras de la zona 1 y 2 presentaron una tendencia al aumento de la

resistencia con el aumento del índice de plasticidad en forma muy evidente en la zona 1 y con valores más bajos en la zona 2; al analizar los resultados en su conjunto, los especímenes de las zonas 2 y 3 muestran una tendencia a disminuir su resistencia con el aumento de la plasticidad, tal como lo muestra la tabla 6.21. En general se asume que la resistencia al corte en condición residual puede generar un comportamiento frágil o dúctil de acuerdo con el grado de sobreconsolidación de los materiales.

Igualmente es apreciable que, al contrario de los resultados obtenidos por (Raba Moyano & Caicedo, 2012) en Sabana de Bogotá, en ninguna de las tres zonas la línea de tendencia pasa por encima de la línea de tendencia registrada por Kenney en 1959 y Olson en 1974 (G441, 2004), al contrario, en los tres casos las líneas de tendencia pasan por debajo de las registradas por estos autores. Es importante anotar que la línea de tendencia obtenida por Kenney y Olson se obtuvo para especímenes con predominancia de caolinita, illita y montmorillonita, encontrando que las muestras con mayor contenido de caolinita presentaban mayores valores de resistencia, seguidos por los suelos con illita y montmorillonita, asociando su comportamiento al desarrollo de procesos de meteorización que afectan con mayor intensidad a suelos con illita y montmorillonita. En el caso de los suelos estudiados, para la zona piloto 1 y la zona piloto 2 se tiene presencia importante de caolinita y moscovita; sin embargo, la presencia de minerales arcillosos interestratificados no diferenciados en la zona piloto 2, puede darle algunas características que pueden dar importantes cambios en su comportamiento. En el caso de la zona piloto 3, predomina la montmorillonita y en segundo lugar la illita lo cual acerca más su comportamiento al registrado por la línea de tendencia de Kenney.

#### 6.2.1.5 Correlación entre la Resistencia al corte no drenado y el índice de Plasticidad

Con base en la literatura existente se tiene que la relación entre la resistencia al corte no drenado medido en laboratorio y el índice de plasticidad se puede expresar mediante la siguiente relación reportada por Skempton para suelos NC:

$$\left(\frac{S_u}{\sigma_{vo}}\right)_{NC} = 0.11 + 0.0037 * IP \quad (6.4)$$



Que indica que la relación entre la resistencia al corte no drenado y el esfuerzo vertical se incrementa con el valor del índice de plasticidad. En estado de sobreconsolidación como es el caso de los suelos en evaluación, la resistencia al corte  $S_u$  se puede determinar tal como lo presenta (Raba Moyano & Caicedo, 2012):

$$\left(\frac{S_u}{\sigma_{vo}}\right)_{SC} = \left(\frac{S_u}{\sigma_{vo}}\right)_{NC} * RSC \quad (6.5)$$

Dado que en las tres zonas piloto se efectuaron ensayos de compresión inconfiada que permite obtener la resistencia al corte no drenado, se desarrolló el análisis de la resistencia al corte no drenado con base en la correlación indicada y con base en los datos de laboratorio que fueron presentadas previamente. De las Figuras 6.23 a 6.25 se presentan las gráficas que muestran la comparación del valor de la relación esta relación  $S_u/\sigma_{vo}$  obtenida a partir de la propuesta de Skempton y la obtenida de los ensayos de laboratorio, para las tres zonas piloto, además de la variación del esfuerzo vertical efectivo con el índice de plasticidad.

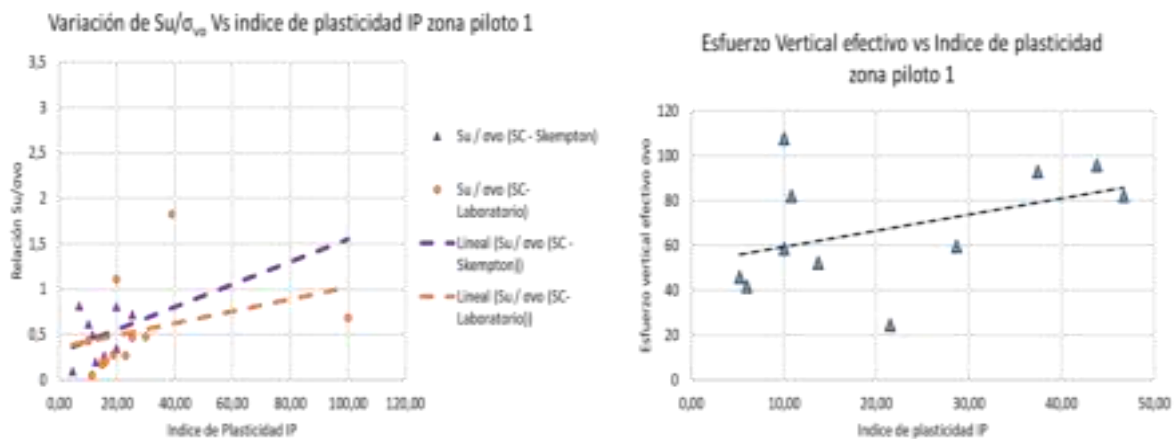


Figura 6.23 Variación de  $S_u/\sigma_{vo}$  con la profundidad para la zona piloto 1

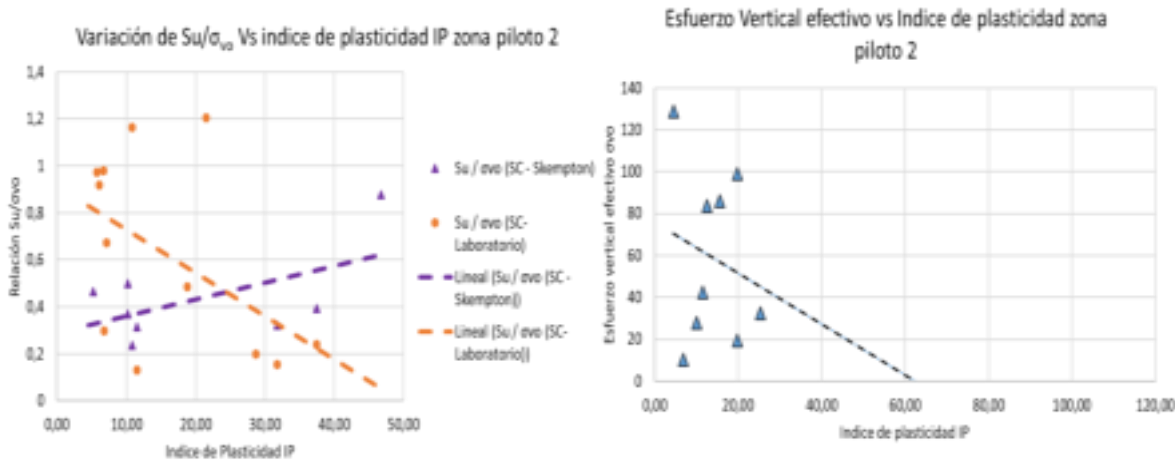


Figura 6.24 Variación de  $S_u/\sigma_{vo}$  con la profundidad para la zona piloto 2

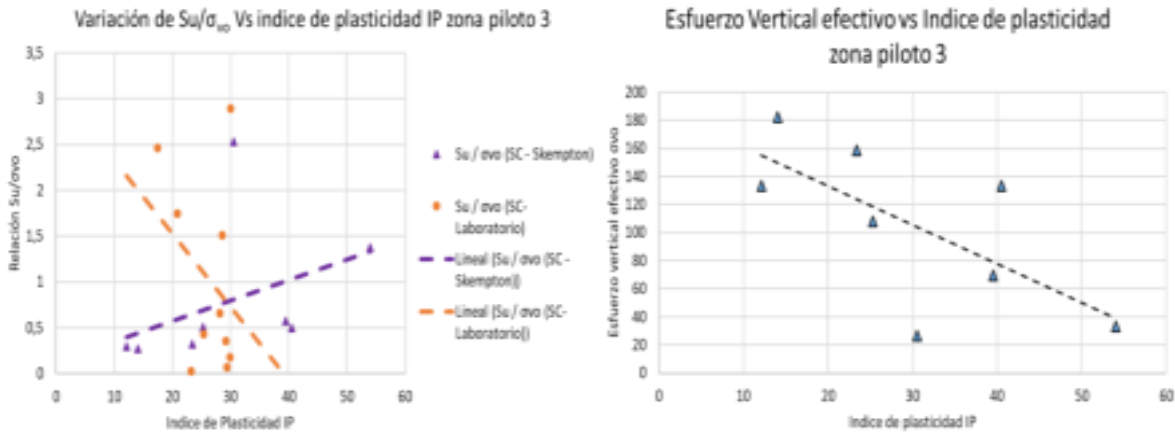


Figura 6.25 Variación de  $S_u/\sigma_{vo}$  con la profundidad para la zona piloto 3

Es importante anotar que los valores de  $S_u$  disminuyen en profundidad para la zona piloto 1, en tanto que para las zonas piloto 2 y 3 aumentan en profundidad; sin embargo, los valores de resistencia al corte no drenado en Sabana y Quindío se encuentran entre 10 kPa hasta aproximadamente 80 kPa, pero en Barranquilla van desde 10 kPa y alcanzan en algunos casos hasta 900 kPa; esto se puede deber a que en el caso de Barranquilla los ensayos se efectuaron sobre las muestras mucho tiempo después de realizado el muestreo, lo que lleva a la pérdida de humedad y condiciones naturales de los materiales. Por lo tanto, parece ser más adecuado analizar estos valores a la luz de la correlación que se presenta en la ecuación 6.4. Nuevamente se tienen valores muy dispersos para los valores de resistencia al corte no drenado.

En general en estas curvas se encuentra que los valores son demasiado dispersos y no se obtiene buena correlación, además los resultados de laboratorio difieren en alto grado de la propuesta de Skempton. Sin embargo, es importante observar, como las zonas piloto 2 y 3 presentan una tendencia de pendiente negativa producto de los valores de laboratorio, es decir los esfuerzos efectivos verticales disminuyen en profundidad, aumentando la plasticidad de los suelos; igualmente este comportamiento se puede asociar a que en las tres zonas se tienen suelos sobreconsolidados en superficie y en proceso de consolidación en profundidad.

#### 6.2.1.6 Análisis de la compresibilidad del suelo

En la tabla 6.18 se presentan las relaciones obtenidas entre  $C_s$  y  $C_c$  por zona piloto y los valores obtenidos de  $E_u$  de laboratorio y a partir de las correlaciones presentadas. La variación de estas variables con la profundidad se presenta en las gráficas 6.25 a 6.27. Para analizar la compresibilidad del suelo, y a partir de los datos que se presentan en la tabla 6.18 respecto de la relación entre  $C_r$  y  $C_c$  se pudo calcular el módulo restringido del suelo  $D'$  (Raba Moyano & Caicedo, 2012) y el módulo no confinado  $E'_s$ , para finalmente obtener el módulo no drenado  $E_u$ , considerando una relación de Poisson y de 0.3. valor típico par materiales finos predominantemente arcillosos

Los valores de  $D'$ ,  $E'_s$  y  $E_u$  se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$D' = \frac{(2.3 * (1 + e_0) * \sigma'_{vo})}{C_s} \quad (6.6)$$

$$E'_s = \frac{(D' * (1 + \nu) * (1 - 2\nu))}{(1 - \nu)} \quad (6.7)$$

$$E_u = \frac{3E'_s}{(2 * (1 + \nu))} \quad (6.8)$$

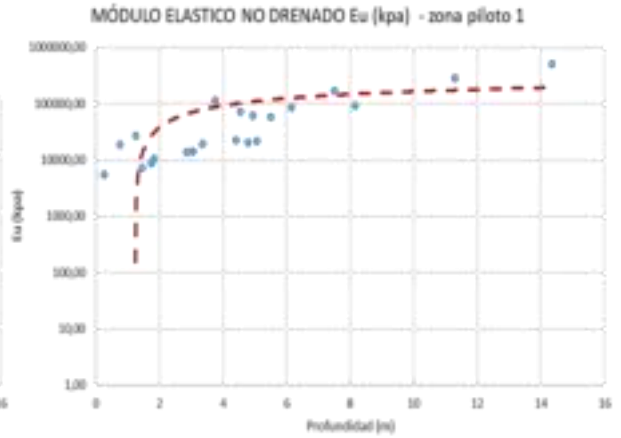
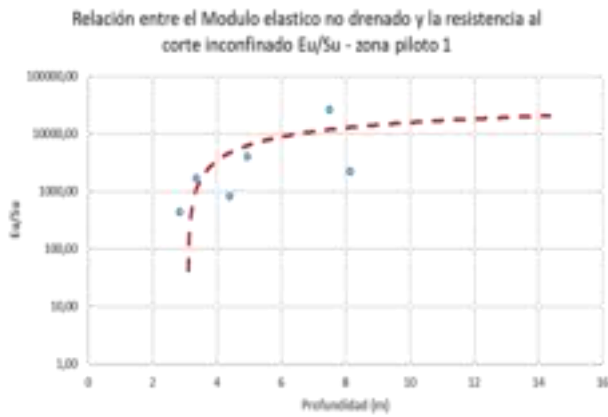


Figura 6.26 relaciones entre el módulo de elasticidad no drenado  $E_u$  y la resistencia al corte no drenado  $S_u$  y el módulo de elasticidad no drenado  $E_u$  zona piloto 1

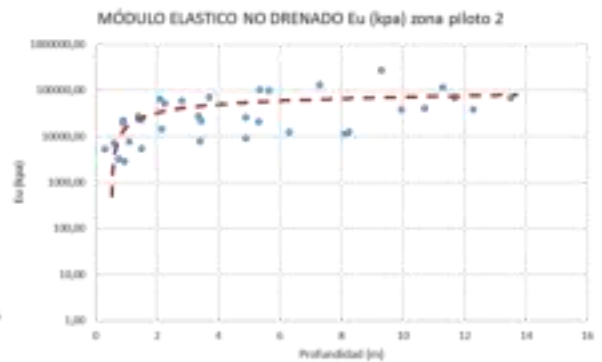
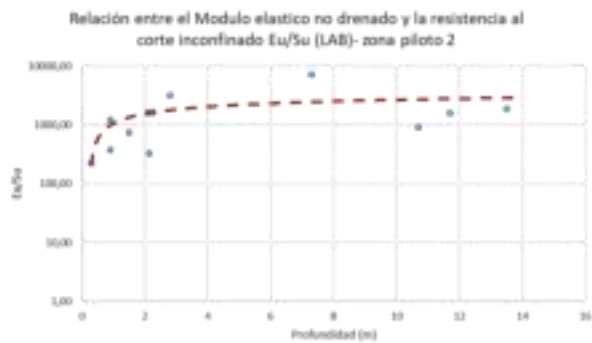


Figura 6.27 relaciones entre el módulo de elasticidad no drenado  $E_u$  y la resistencia al corte no drenado  $S_u$  y el módulo de elasticidad no drenado  $E_u$  zona piloto 2

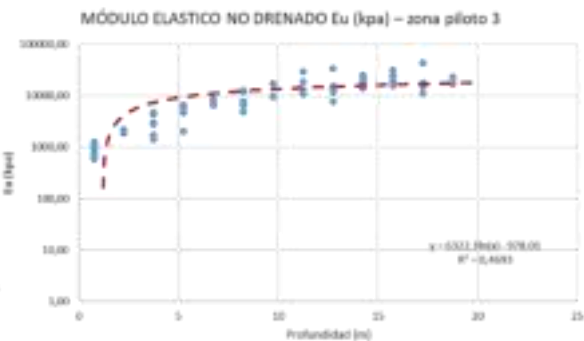
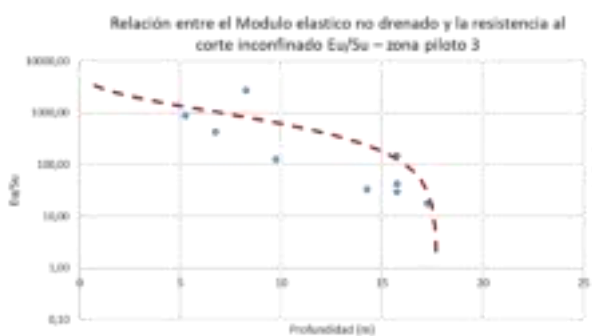


Figura 6.28 relaciones entre el módulo de elasticidad no drenado  $E_u$  y la resistencia al corte no drenado  $S_u$  y el módulo de elasticidad no drenado  $E_u$  zona piloto 3

Con base en estas gráficas se observa que los valores del módulo no drenado  $E_u$  teóricos son bastante consistentes en las tres zonas piloto y muestran una tendencia ascendente en

profundidad; en donde las relaciones obtenidas con base en las correlaciones teóricas , definen el alto rango de los valores estadísticos; este comportamiento puede estar asociado con reducción del módulo por la alteración de las muestras en el laboratorio por la manipulación; igualmente se tienen valores atípicos para la zona piloto 3 a más de 15.0 metros de profundidad, lo que genera una tendencia atípica para esta zona.

### **6.2.2 Modelo Mohr Coulomb, Cam Clay y Duncan Shang**

Para el desarrollo de estos modelos se usaron los resultados de los ensayos triaxiales desarrollados para la zona piloto 1 y 2, además de los resultados de los ensayos de consolidación; sin embargo, para la zona piloto 3 al no contar con resultados de ensayos triaxiales se usaron los ensayos producto del ensayo de corte y los resultados del ensayo de consolidación. Es importante anotar que para la zona piloto 2 solo se pudo desarrollar un ensayo triaxial, pero solo se obtuvo resultados para dos puntos debido a las condiciones de los materiales. Los parámetros requeridos para la construcción de los modelos esfuerzo- deformación se presentan en el Anexo 6.1.

El análisis se ha realizado con los parámetros resistentes en términos de esfuerzos efectivas obtenidos del análisis estadístico de datos de laboratorio por zona piloto para el tipo de material no drenado, usando los valores medios, especialmente cuando no se cuenta con datos del ensayo triaxial o cuando los datos del ensayo no son representativos. Como esfuerzo vertical efectivo ( $\sigma_v'$ ) para la simulación se usó 100 kPa usado en los ensayos de laboratorio de las tres zonas piloto.

Los modelos contemplan un proceso ideal de muestro, en el cual se tiene el efecto de alivio de esfuerzos en el momento de la extracción de las muestras, asumiendo para esta situación una condición no drenada. Luego se modela la condición de carga axial, hasta lograr una condición de la falla. En la figura 6.29 se presenta la Malla de Elementos Finitos considerada para la modelación; se trata de una malla uniaxial de 20 cm de radio y 10 cm de altura con eje de rotación por su borde izquierdo. La malla incluye 1798 elementos triangulares de 6 nodos cada elemento; doble sistema de carga; el sistema Mload A, abarca el ancho de la malla y se utiliza para establecer las condiciones iniciales del sitio, justo antes de recuperar la muestra, y el sistema MLoad B para determinar el

esfuerzo desviador que se aplica sobre el tope de la muestra cilíndrica en el momento de modelar el ensayo de compresión como tal (Figura 6.30).

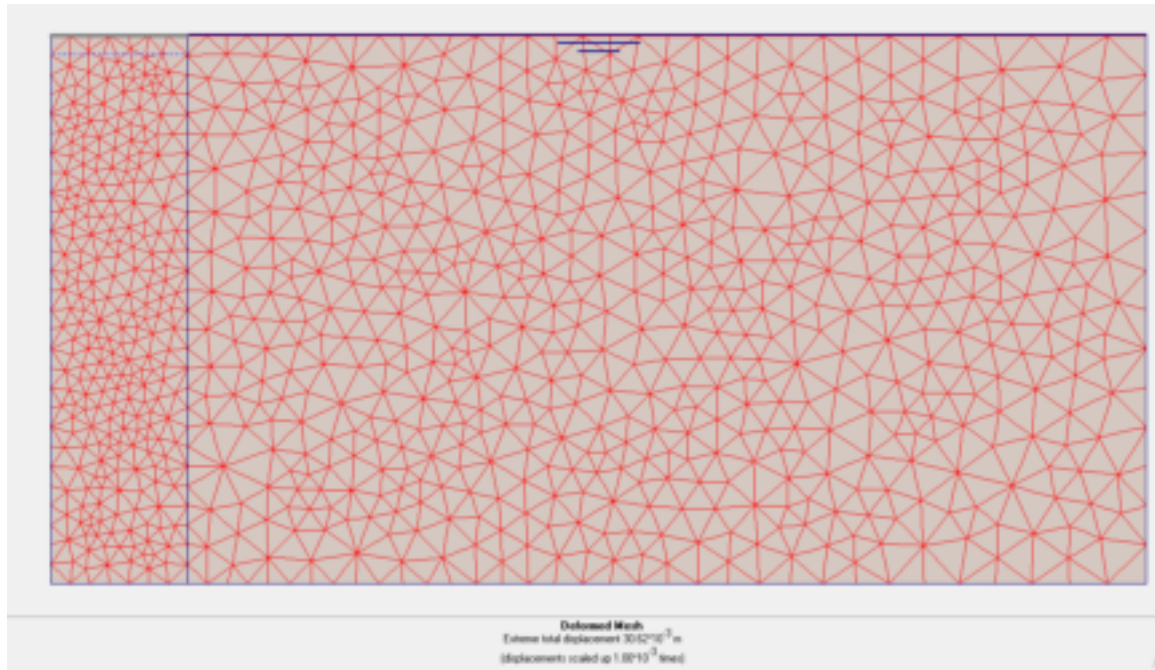


Figura 6.29 Malla de Elementos Finitos



Figura 6.30 Vectores de desplazamiento de muestra cilíndrica en condición de falla.

Tras la calibración del modelo y de los parámetros geotécnicos de entrada, se evalúa la representatividad de los modelos constitutivos usados, es decir se realiza el análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante los ensayos del laboratorio y los modelos numéricos; a continuación se describe la metodología utilizada.

#### **6.2.2.1 Caracterización de resistencia y compresibilidad**

La determinación de los parámetros de resistencia al corte de los suelos en condiciones drenadas y no drenadas se realizó con base en los resultados de ensayos de compresión inconfiada, sobre muestras representativas de suelos en estado inalterado, y la ejecución de los ensayos de corte directo en condiciones sumergidas (condición más crítica) y cargadas a una baja tasa de deformación, simulando lo mejor posible una condición de carga drenada.

De los ensayos de corte directos se, determinando con ellos la envolvente de resistencia al corte tipo Coulomb, en condiciones drenadas, expresada como una componente de cohesión ( $c'$ ) y un ángulo de fricción ( $\phi'$ ). Para la determinación de los parámetros no drenados de resistencia al corte de los suelos ( $C_u$ ), se con ensayos de compresión simple.

Con el fin de efectuar un modelo estadístico de los parámetros de resistencia de los suelos, en condiciones drenadas y no drenadas, y teniendo en cuenta que la totalidad de suelos estudios son predominantemente finos, para el análisis se consideraron los criterios de resistencia al corte de suelos planteados por Skempton & Bjerrum (1957), en función de su estado de preconsolidación.

Los análisis se efectuaron correlacionando los ensayos de resistencia obtenidos de las muestras de compresión simple y corte directo, con los ensayos de plasticidad de suelos efectuados a toda la población de muestras; mediante estas correlaciones se contó con una herramienta estadística para valorar la variación de los parámetros de resistencia al corte de los diferentes tipos de suelos encontrados en la zona.

El procedimiento de correlación es el siguiente:

Se determina el esfuerzo de preconsolidación se determina a partir de ensayos edométricos con base en la fórmula de Skempton (1953) así:

$$\frac{C_u}{p'} = 0.11 + 0.0037 IP \quad (6.9)$$

En donde  $p'$  = esfuerzo vertical efectivo de preconsolidación

IP = Índice de plasticidad

A partir de esta fórmula se determina el esfuerzo vertical efectivo de preconsolidación ( $p'$ ), el cual es comparable con los resultados obtenidos en ensayos edométricos.

Para la determinación de los parámetros de resistencia en la zona normalmente consolidada, de la Figura 6.31 se obtiene el ángulo de fricción  $\phi_{NC}$  en función del Índice de plasticidad.

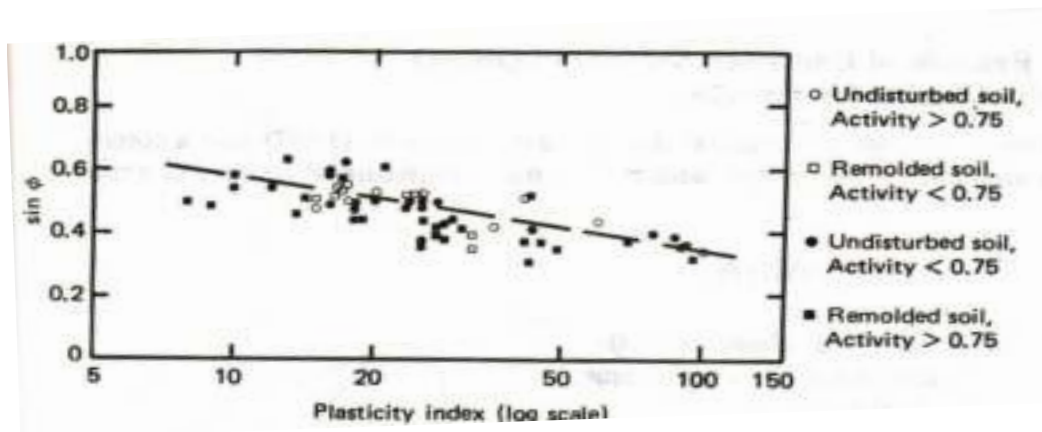


Figura 6.31 Relación entre el ángulo de fricción NC y el Índice de Plasticidad, Das, Braja, 1983.

Estos valores se comparan con los resultados obtenidos en la zona NC de los ensayos de corte directo. Para la determinación de los parámetros de resistencia en la zona sobre consolidada, se determinó el ángulo de fricción verdadero, a partir del índice de plasticidad, con base en la tendencia de la Figura 6.32.



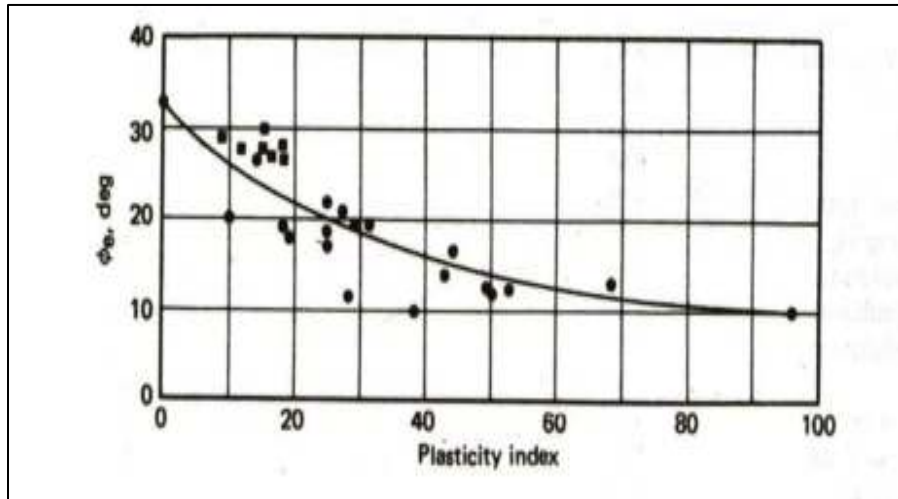


Figura 6.32 Relación entre el ángulo de fricción SC y el Índice de Plasticidad, Das, Braja, 1983.

Con los datos anteriores se determinó la envolvente de resistencia en la zona sobreconsolidada, a partir del esfuerzo de consolidación que se adopta como la mitad del esfuerzo de preconsolidación del ensayo edométrico. Mediante relaciones geométricas se obtiene el valor de cohesión  $C_e$  (Figura 6.33)

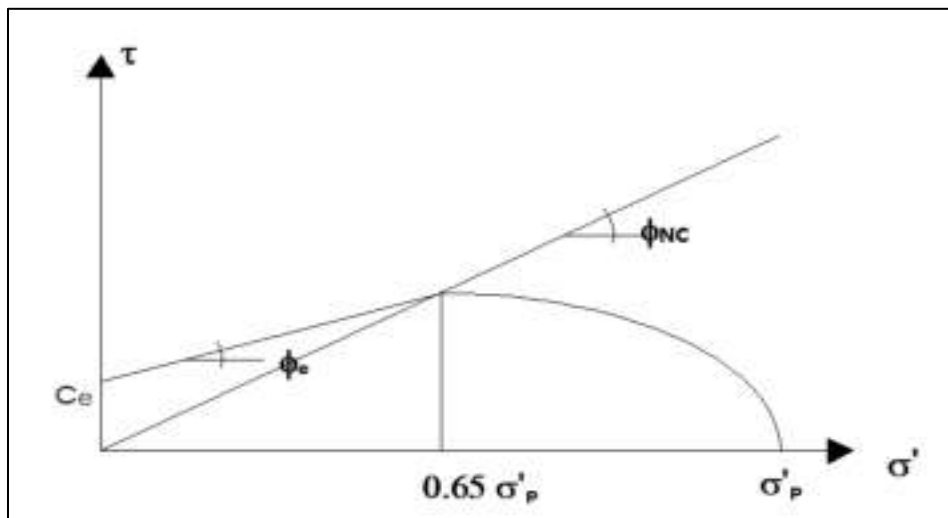


Figura 6.33 Diagrama conceptual para obtener la cohesión  $c_e$ .

Dado que los suelos tienen un alto contenido de finos plásticos, los parámetros no drenados de compresibilidad del suelo a partir de la siguiente ecuación:

$$Eu = \beta \times Cu \quad (6.10)$$

Los parámetros drenados de compresibilidad de suelos se determinaron en función del coeficiente compresión y recompresión mediante las siguientes ecuaciones:

En la zona sobreconsolidada (SC):

$$E_{SC} = \frac{2.3 \cdot (1 + eo)}{c_r} \times \frac{(\sigma'_{vo})}{2} \times \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (6.11)$$

En la zona de consolidación normal (NC):

$$E_{NC} = \frac{2.3 \cdot (1 + eo)}{c_c} \times \sigma'_p \times \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (6.12)$$

De los ensayos edométricos se obtienen los correspondientes coeficientes de compresibilidad  $C_r$  y  $C_c$ , que corresponden a los índices de recompresión y compresión obtenidos respectivamente de la zona sobreconsolidada y normalmente consolidada;  $e_0$ , corresponde a la relación de vacíos; estas curvas se ajustan al modelo para diferentes suelos mediante la aplicación de ecuaciones lineales o formulas empíricas debidamente calibradas con el límite líquido.

Los parámetros geotécnicos se reajustaron en el programa de elementos finitos para alcanzar la mejor representatividad del comportamiento de los diferentes suelos en el laboratorio. La comparación realizada solo se efectuó para las correlaciones entre la variación del esfuerzo desviador ( $\sigma$ ) con deformación axial ( $\varepsilon$ ); es importante anotar que debido a que para el análisis solo se contaban con tres ensayos triaxiales, dos en Sabana y uno en Quindío para la calibración de los modelos y no se contaba con ensayos triaxiales en Barranquilla, esta calibración se realizó con base en los ensayos de compresión simple con los cuales se contaba para todas las zonas de estudio.

En las tablas 6.20 a 6.25 se presenta el resumen de los parámetros usados para la modelación

*Tabla 6.20  
Datos básicos del suelo tomados para modelación tres zonas piloto*

DESCRIPCION	SB	Prof (m)		Zpro m (m)	W n (%)	L L (%)	L P (%)	I P (%)	Yt (KN/m <sup>3</sup> )	CuLAB (KPa)	Gs	PT200 (%)	svo (KPa)	mo (KPa)	svo' (KPa)
Arcilla sed	Zona 1- Sabana	0	10	5	35	44	32	12	18,1	23	2,62	91	90,5	20	70,5
Arcilla volcanica	Zona 2- Quindio	0	10	5	49	53	38	15	16,1	35	2,69	69	80,4	20	60,4
Arcilla calcarea	Zona 3- Barranquilla	0	10	5	24	74	30	44	19,6	319	2,96		98,1	20	78,1

*Tabla 6.21  
Datos relaciones de fase tomados para modelación tres zonas piloto*

DESCRIPCION	SB	Wn (%)	Gs	gt (KN/m <sup>3</sup> )	gtsat (KN/m <sup>3</sup> )	Yd (KN/m <sup>3</sup> )	Yw (KN/m <sup>3</sup> )	s (%)	Wsate (%)	
Arcilla sed	Zona 1- Sabana	35	2,62	18,09	18,09	13,4	9,81	100	0,92	35
Arcilla volcanica	Zona 2- Quindio	49	2,69	16,08	16,58	10,78	9,81	91	1,45	54
Arcilla calcarea	Zona 3- Barranquilla	24	2,96	19,62	20,25	15,77	9,81	86	0,84	28

*Tabla 6.22  
Datos cohesión y fricción suelos tomados de ensayos de laboratorio y correlaciones tomados para modelación tres zonas piloto*

DESCRIPCION	SB	svo' (KPa)	CuLAB (KPa)	CuDIS (KPa)	sp' (KPa)	POP	OCR	Ko	so' (KPa)	fNC (°)	ce' (KPa)	fe (°)	
Arcilla sed	Zona 1- Sabana	70,47	12	23	23	147	77	2,09	0,61	52,3	35,18	23,64	24,62
Arcilla volcánica	Zona 2- Quindío	60,4	15	35	35	212	152	3,51	0,83	53,6	33,85	32,65	23,46
Arcilla calcárea	Zona 3- Barranquilla	78,08	44	319	319	1168	1089	14,95	2,17	139	26,03	163,13	15,29

*Tabla 6.23*  
*Módulos del suelo tomados para modelación tres zonas piloto*

DESCRIPCION	SB	$\lambda^*$	$\kappa^*$	k (m/día)	k (m/seg)
Arcilla sed	Zona 1- Sabana	0,044	0,014	4,51E-05	5,22E-10
Arcilla volcánica	Zona 2- Quindío	0,099	0,017	6,18E-05	7,15E-10
Arcilla calcárea	Zona 3- Barranquilla	0,056	0,025	7,11E-05	8,23E-10

*Tabla 6.24*  
*datos variables tomados de ensayos de laboratorio para modelación tres zonas piloto*

DESCRIPCION	SB	Cr	Cc	Cv (m <sup>2</sup> /día)	(1/mv) <sub>sc</sub> (KPa)	(1/mv) <sub>nc</sub> (KPa)	v	E <sub>sc</sub> (KPa)	E <sub>nc</sub> (KPa)	$\beta$	E <sub>u</sub> (KPa)
Arcilla sed	Zona 1- Sabana	0,028	0,193	0,025	5548	1610	0,278	4360	1265	1241	28542
Arcilla volcánica	Zona 2- Quindío	0,042	0,558	0,025	4044	609	0,283	3138	472	1167	40844
Arcilla calcárea	Zona 3- Barranquilla	0,047	0,237	0,025	3517	1395	0,349	2199	872	553	176256

*Tabla 6.25*  
*variables finales tomadas de ensayos de laboratorio y depuración de información tomados para modelación tres zonas piloto*

DESCRIPCION	SB	NC (°)	ce' (KPa)	e (°)	Cu (KPa)	p' (KPa)	E (KPa)	Eu (kPa)	
Arcilla sed	Zona 1- Sabana	27,80	31,01	11,50	23,0	147	0,278	7047	44103
Arcilla volcánica	Zona 2- Quindío	34,50	28,41	25,70	35,0	212	0,283	7007	30398
Arcilla calcárea	Zona 3- Barranquilla	34,00	156,40	25,10	319,0	1168	0,349	15538	19376

### 6.2.2.2 Modelo Mohr Coulomb (MC) y Cam Clay (CC)

Este modelo ignora los efectos del esfuerzo principal intermedio, lo cual es llega a ser inconsistente con resultados experimentales; igualmente genera predicciones conservadoras de la

resistencia cortante del suelo y debido a la presencia de esquinas en la superficie de fluencia puede generar inconvenientes en aplicaciones tridimensionales, dificultando la convergencia de los modelos. En las tablas 6.26 a 6.28 se presentan los parámetros obtenidos para el modelo en las Figuras 6.34 a 6.35 se presentan las trayectorias de esfuerzos obtenidos, para el caso de las zonas 1 y 2, consolidados isotrópicamente y fallados en condición no drenada CU, y su comparación con las dos líneas de flujo definidas en el modelo Mohr Coulomb para suelos NC y SC; para el caso de Barranquilla se generaron los parámetros a partir de los ensayos de corte CD y los ensayos de consolidación.

*Tabla 6.26*

*Parámetros modelo Mohr Coulomb zona piloto 1 – TAB1; superior M3 Y M4, inferior M7 Y M8*

<b>sf'</b> <b>kPa</b>	<b>tf</b> <b>kPa</b>	<b>ae</b> <b>kPa</b>	<b><math>\alpha_e</math></b> <b>°</b>	<b><math>\alpha_{NC}</math></b> <b>°</b>	<b>ce</b> <b>kPa</b>	<b><math>\phi_e</math></b> <b>°</b>	<b><math>\phi_{NC}</math></b> <b>°</b>
75,65	32,75						
144,42	67,92	4,11	22,5	23,0	4,51	24,5	25,1
281,52	119,32						

*Tabla 6.27*

*Parámetros modelo Mohr Coulomb zona piloto 2 – TEB- M6 Y M7*

<b>sf'</b> <b>kPa</b>	<b>tf</b> <b>kPa</b>	<b>ae</b> <b>kPa</b>	<b><math>\alpha_e</math></b> <b>°</b>	<b><math>\alpha_{NC}</math></b> <b>°</b>	<b>ce</b> <b>kPa</b>	<b><math>\phi_e</math></b> <b>°</b>	<b><math>\phi_{NC}</math></b> <b>°</b>
98,60	47,60						
166,90	76,80	5,21	23,2	24,1	5,77	25,4	26,6
293,97	131,47						

Tabla 6.28  
Parámetros modelo Morh Coulomb zona piloto 3

$sf'$ kPa	$tf$ kPa	$ae$ kPa	$\alpha_e$ °	$\alpha_{NC}$ °	$ce$ kPa	$\phi_e$ °	$\phi_{NC}$ °
75,19	92,59	67,76	18,3	32,9	71,79	19,3	40,2
214,63	138,63						

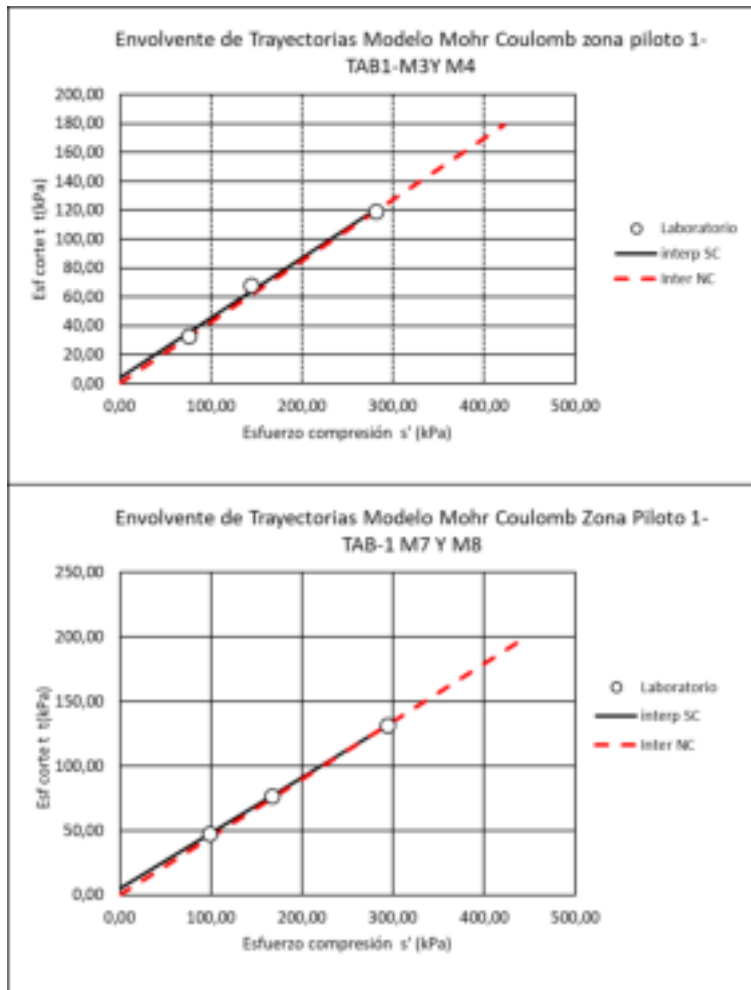


Figura 6.34 Envoltentes de trayectorias modelo Mohr Coulomb zona piloto 1-TAB 1

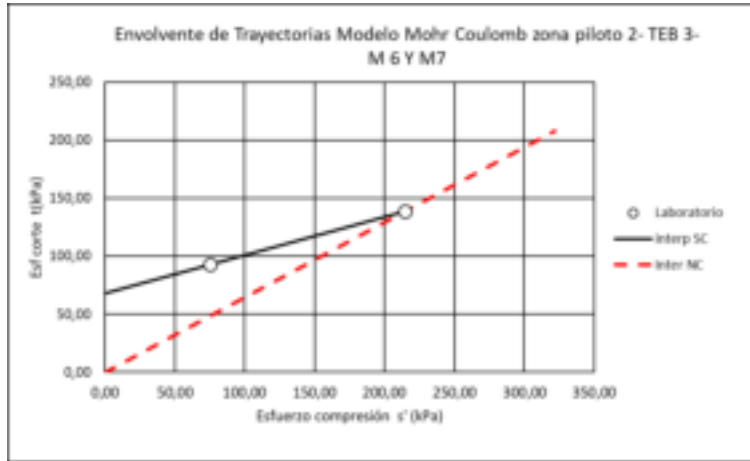


Figura 6.35 Envolventes de trayectorias modelo Mohr Coulomb zona piloto 2-TEB 3

De la misma forma que lo descrito previamente, el modelo Cam Clay (CC) no contempla la influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento del suelo, lo cual es un aspecto esencial en el comportamiento de los suelos arcillosos; en las tablas 6.29 y 6.31 se presentan los parámetros obtenidos para el modelo Cam Clay para las zona piloto 1 y 2 respectivamente, y en las Figura 6.36 y 6.37 se presentan las trayectorias de esfuerzos obtenidos de ensayos de compresión triaxial, consolidados isotrópicamente y fallados en condición no drenada CU, y su comparación con las tres líneas de flujo definidas en el modelo Cam Clay; es importante anotar que en las tres zonas pilotos los suelos se presentan sobreconsolidados, siendo la zona 1 la que presenta una menor sobreconsolidación, entendiéndose que este modelo se aproxima en mejor forma para materiales NC o con ligera sobreconsolidación.

Tabla 6.29 Parámetros modelo Cam Clay zona piloto 1 – TAB1; superior M3 Y M4, inferior M7 Y M8

$\sigma_{1f}'$ kPa	$\sigma_{3f}'$ kPa	$p_{f'}$ kPa	$q_f$ kPa	$q_f/p_{f'}$	$g$ kPa	$h$	$M$
108,41	42,90	64,74	65,51	1,012			
212,35	76,50	121,78	135,85	1,116	9,70	0,959	0,987
400,85	162,20	241,75	238,65	0,987			

Tabla 6.30

Parámetros modelo Cam Clay zona piloto 2 – TEB 3; M6 Y M7

$\sigma_{1f}$ kPa	$\sigma_{3f}$ kPa	$p_f$ kPa	$q_f$ kPa	$q_f/p_f$	$g$ kPa	$h$	$M$
146,20	51,00	82,73	95,20	1,151			
243,70	90,10	141,30	153,60	1,087	12,16	1,002	1,051
425,44	162,50	250,15	262,94	1,051			

Tabla 6.31

Parámetros modelo Cam Clay zona piloto 3

$\sigma_{1f}$ kPa	$\sigma_{3f}$ kPa	$p_f$ kPa	$q_f$ kPa	$q_f/p_f$	$g$ kPa	$h$	$M$
167,78	-17,40	44,33	185,18	4,178	152,29	0,742	1,646
353,26	76,00	168,42	277,26	1,646			



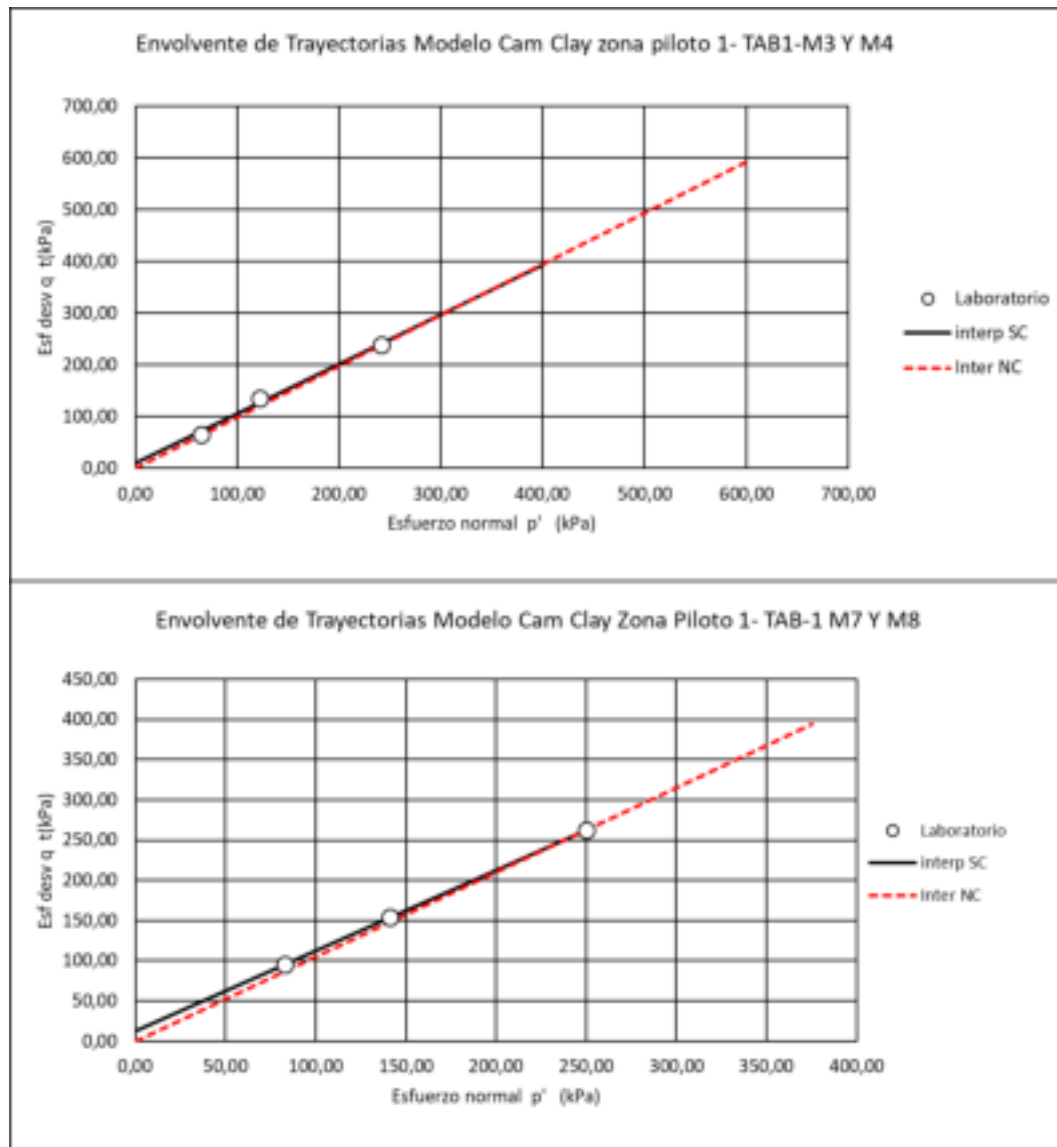


Figura 6.36 Envoltentes de trayectorias modelo Cam Clay zona piloto 1-TAB 1

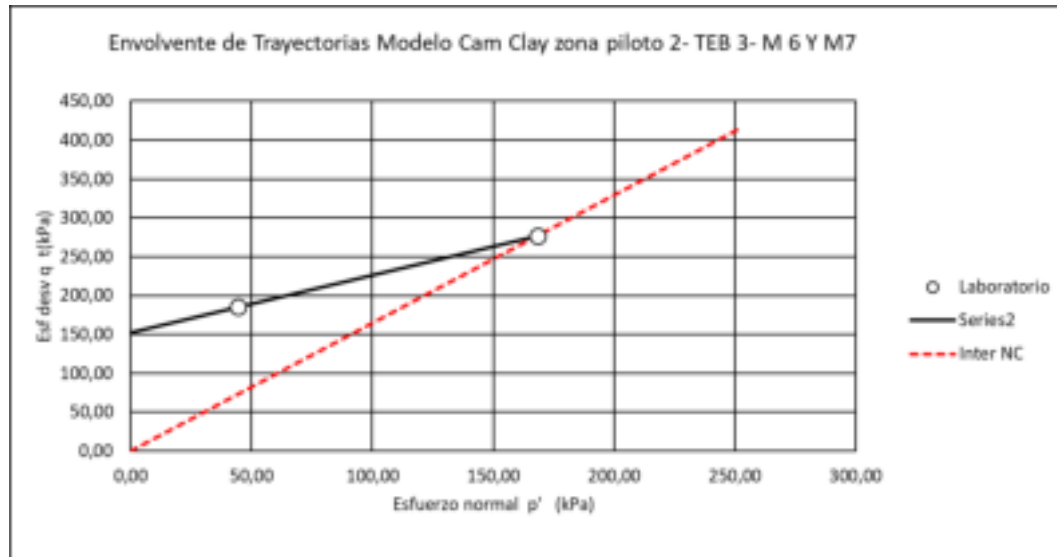


Figura 6.37 Envoltentes de trayectorias modelo Cam Clay zona piloto 2- TEB-3

Tal como se observa, a pesar de que el modelo aplica específicamente para materiales NC y los materiales presentes son sobreconsolidados en las dos zonas piloto, se observa que comparando los resultados de los ensayos triaxiales de laboratorio con las envoltentes de trayectorias de esfuerzos generadas por el modelo MC se genera una buena aproximación para la zona piloto 1 para las dos muestras ensayadas; en la zona piloto 2 se observa una diferencia importante de los resultados del modelo con los resultados del laboratorio, sin embargo una de las causas asociadas está en que no se pudieron obtener los tres puntos requeridos para completar el ensayo triaxial.

Respecto de los resultados obtenidos del modelo CC al simular las envoltentes de trayectorias de esfuerzos con los datos de los ensayos triaxiales de laboratorio, a pesar de que el modelo aplica especialmente para materiales NC y los materiales presentes son sobreconsolidados en las dos zonas piloto, se observa que se presentan trayectorias de muestras normalmente consolidadas en donde se aprecia un buen ajuste.

Finalmente, y con base en la información que se presenta en la tabla 6.33 se efectuó la modelación con los resultados de la modelización mediante Plaxis con los datos de entrada de los ensayos triaxiales, de consolidación y de corte y se comparó con los resultados de los ensayos de compresión simple de laboratorio, resultados que se presentan en las Figuras 6.38 a 6.40.

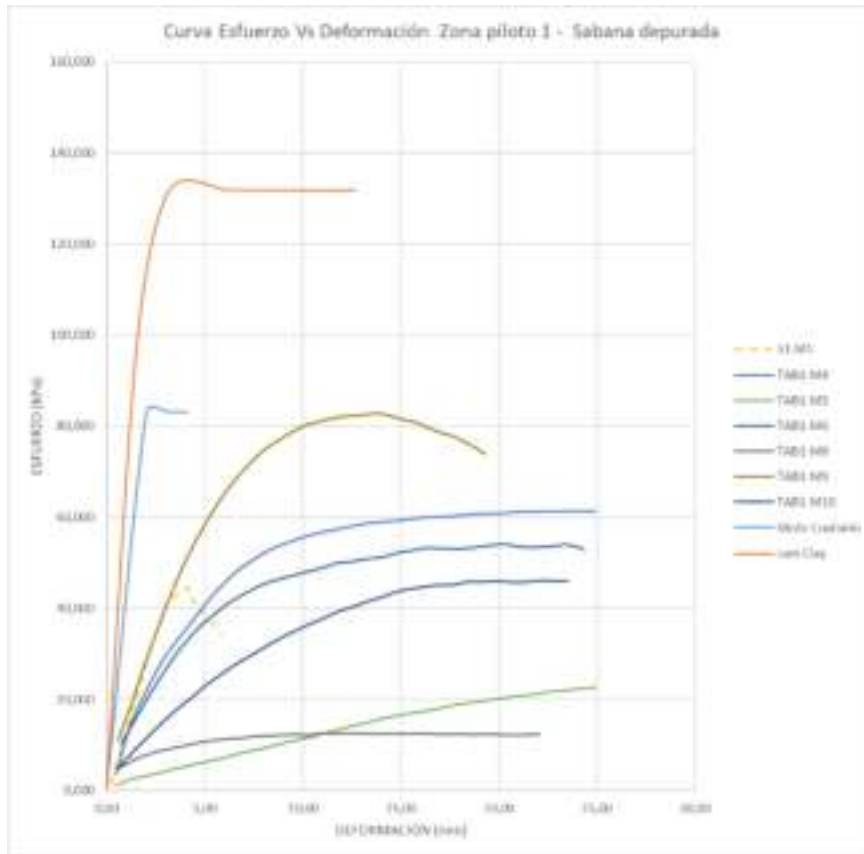


Figura 6.38 Comparativa de curvas  $\sigma - \epsilon$  de los ensayos de compresión simple y calculadas mediante el modelo de MC para las muestras zona piloto 1 – Sabana con  $\sigma_v'$  de 100 kPa

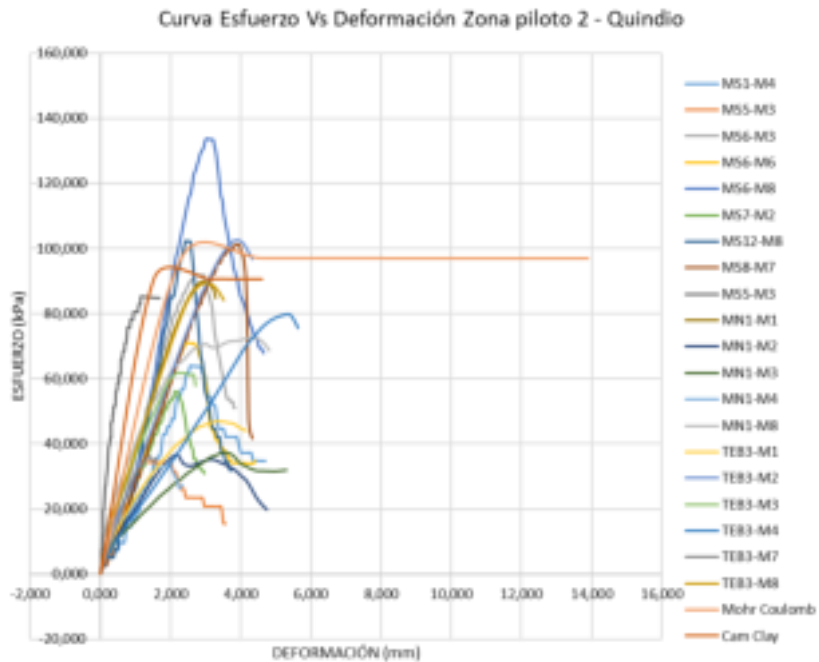


Figura 6.39 Comparativa de curvas  $\sigma - \epsilon$  de los ensayos de compresión simple y calculadas mediante el modelo de MC para las muestras zona piloto 2- Quindío con  $\sigma_v'$  de 100 kPa

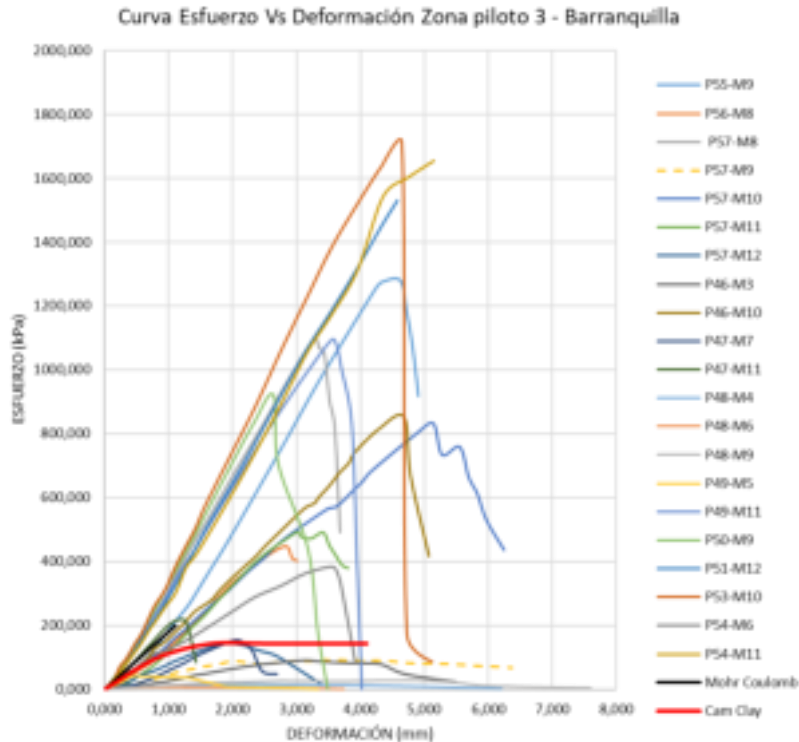


Figura 6.40 Comparativa de curvas  $\sigma - \epsilon$  de los ensayos de compresión simple y calculadas mediante el modelo de MC para las muestras zona piloto 3- Barranquilla con  $\sigma_v'$  de 100 kPa

Al observar las figuras en las que se presentan los resultados de los ensayos UU en diferentes colores y los resultados de la modelización mediante Plaxis para las curvas esfuerzo – deformación de los suelos en las tres zonas piloto, para los modelos MC y CC con los datos de entrada de los diferentes ensayos que permitieron calibrar los modelos, se puede observar que para la zona piloto 1 los resultados de las simulación tanto para MC como para CC dan bastante por encima de los valores obtenidos en laboratorio, sin embargo se tienen pendientes similares en la zona elástica; esto se podría asociar a posible remoldeo durante la toma de muestras y / o manipulación en el laboratorio. En la zona piloto 2, se tiene que los modelos MC y CC simulan en forma bastante aproximada el comportamiento del material, especialmente en el rango elástico, esto en parte se asocia al grado de cementación que pueden tener estos suelos propio de su origen volcánico. Finalmente, en la zona 3, dado los muy altos valores de la resistencia obtenidos en el ensayo de compresión simple, ni el modelo MC ni el modelo CC se ajustan a los resultados obtenidos en el laboratorio. Una causa puede asociarse a los procesos rápidos de desecación que sufren estos materiales producto de su origen calcáreo.

### 6.2.2.3 Modelo Duncan Shang

El modelo hiperbólico fue propuesto inicialmente por (Kondner & Zelasko, 1963), y se presentó en forma ajustada por (Duncan & Chang, 1970); la hipótesis principal del modelo supone que las curvas esfuerzo-deformación del suelo pueden aproximarse a una curva hiperbólica que relaciona el esfuerzo desviador con la deformación axial. Los variables que se requieren para trabajar con el modelo se encuentran en función del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo cortante, los cuales pueden ser obtenidos por ensayos de compresión triaxial. Aunque este modelo es muy usado en la práctica de la ingeniería ya que los parámetros del suelo pueden ser obtenidos directamente de un ensayo triaxial, presenta una desventaja importante que es la imposibilidad de distinguir entre los ciclos de carga y descarga, por lo cual los análisis por ciclo se hacen en forma independiente y al final se efectúa el análisis integrado del modelo. De las Figuras 6.41 a 6.43 se presenta el análisis por punto de carga para las zonas piloto 1 y 2 y en el Anexo 6.2 se presentan las tablas de cálculo resultantes.

En las tablas 6.32 a 6.34 se presentan los parámetros obtenidos para el modelo Duncan Chang integrado para las tres zonas piloto y en las Figura 6.44 y 6.45 se presentan las trayectorias de esfuerzos obtenidos de ensayos de compresión triaxial, consolidados isotrópicamente y fallados en condición no drenada CU; es importante anotar que en las tres zonas pilotos los suelos se presentan sobreconsolidados, siendo la zona 1 la que presenta una menor sobreconsolidación. No se pudo efectuar los análisis con este modelo para la zona piloto 3, debido a que no se tienen datos producto del ensayo triaxial.

*Tabla 6.32*  
*Parámetros modelo Duncan Shang zona piloto 1 – TAB1; superior M3 Y M4, inferior M7 Y M8*

p'	medidos		Teóricos	
	Eo	qult MH	Eo	qult MH
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
75,00	7743	72,9	7951	75
150,00	16894	153,6	16023	143
300,00	31445	263,8	32288	273
		$\alpha$	101,143	1,372
		$\beta$	1,011	0,928

Tabla 6.33  
Parámetros para la modelización PLAXIS

p'	medidos			Teóricos	
	Eo	qult MH	log Qu	Eo	qult MH
kPa	kPa	kPa		kPa	kPa
75,00	6926	113,8	2,05598981	8097	111
150,00	21858	174,0	2,24064671	15989	181
300,00	27003	301,5	2,4792171	31572	295
		$\alpha$		116,915	5,357
		$\beta$		0,982	0,703

Tabla 6.34  
Parámetros modelo Duncan Shang zona piloto 2 – TEB 3; M6 Y M7

p'	medidos		Teóricos	
	Eo	qult MH	Eo	qult MH
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
75,00	35176	514,4	35176	514
150,00	55768	490,5	55768	490
		$\alpha$	1993,402	691,555
		$\beta$	0,665	-0,069

Al efectuar un análisis integrado se puede resolver la deficiencia que presenta el modelo de no distinguir entre los ciclos de carga y descarga. En los resultados obtenidos, se puede ver que el modelo ajusta en forma correcta en las dos zonas piloto; sin embargo, al tener muy poca información de estos ensayos no se puede establecer una generalización de los resultados.

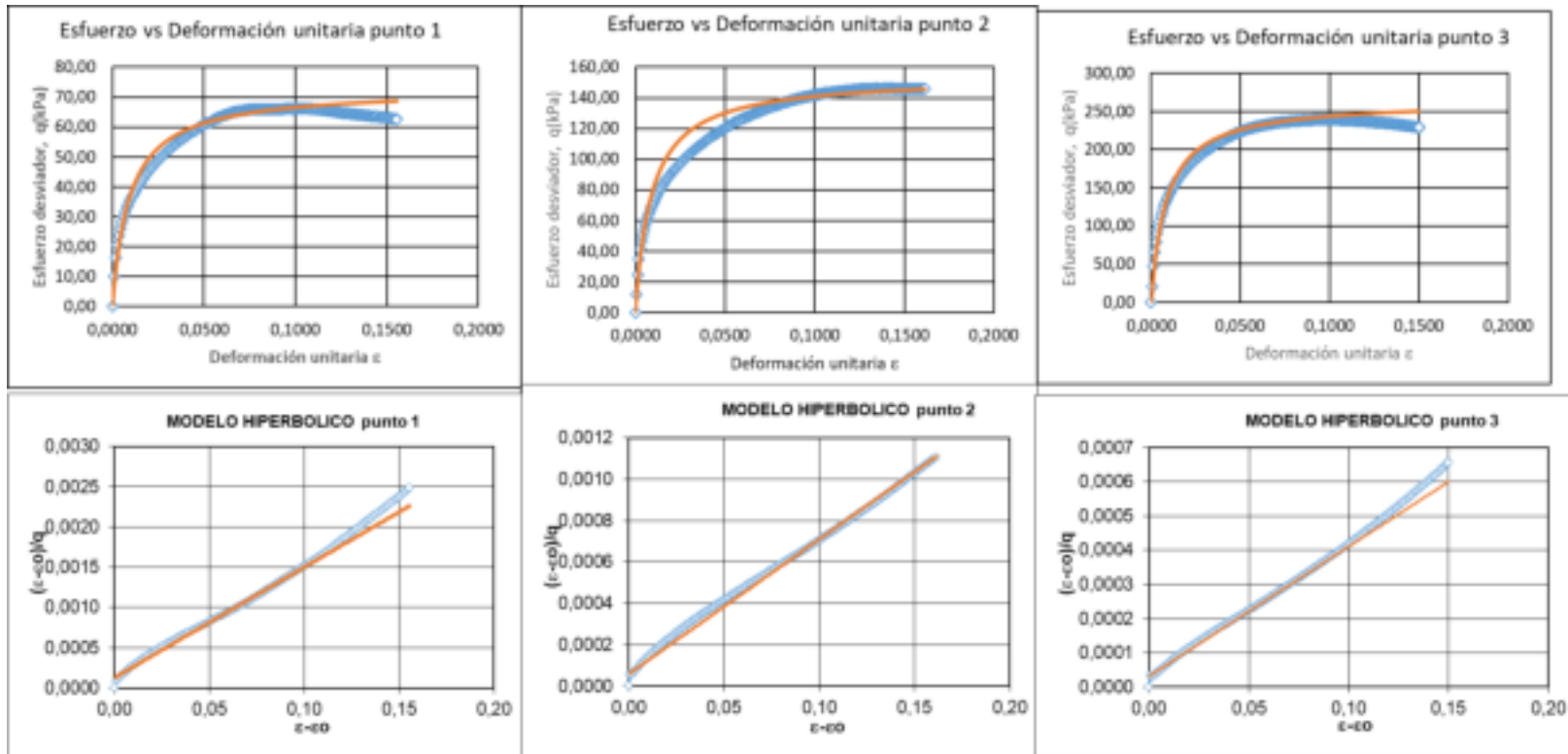


Figura 6.41 Relación esfuerzo y deformación y modelo hiperbolico por punto de carga modelo Duncan Chang zona piloto 1-TAB 1- M3 Y M4

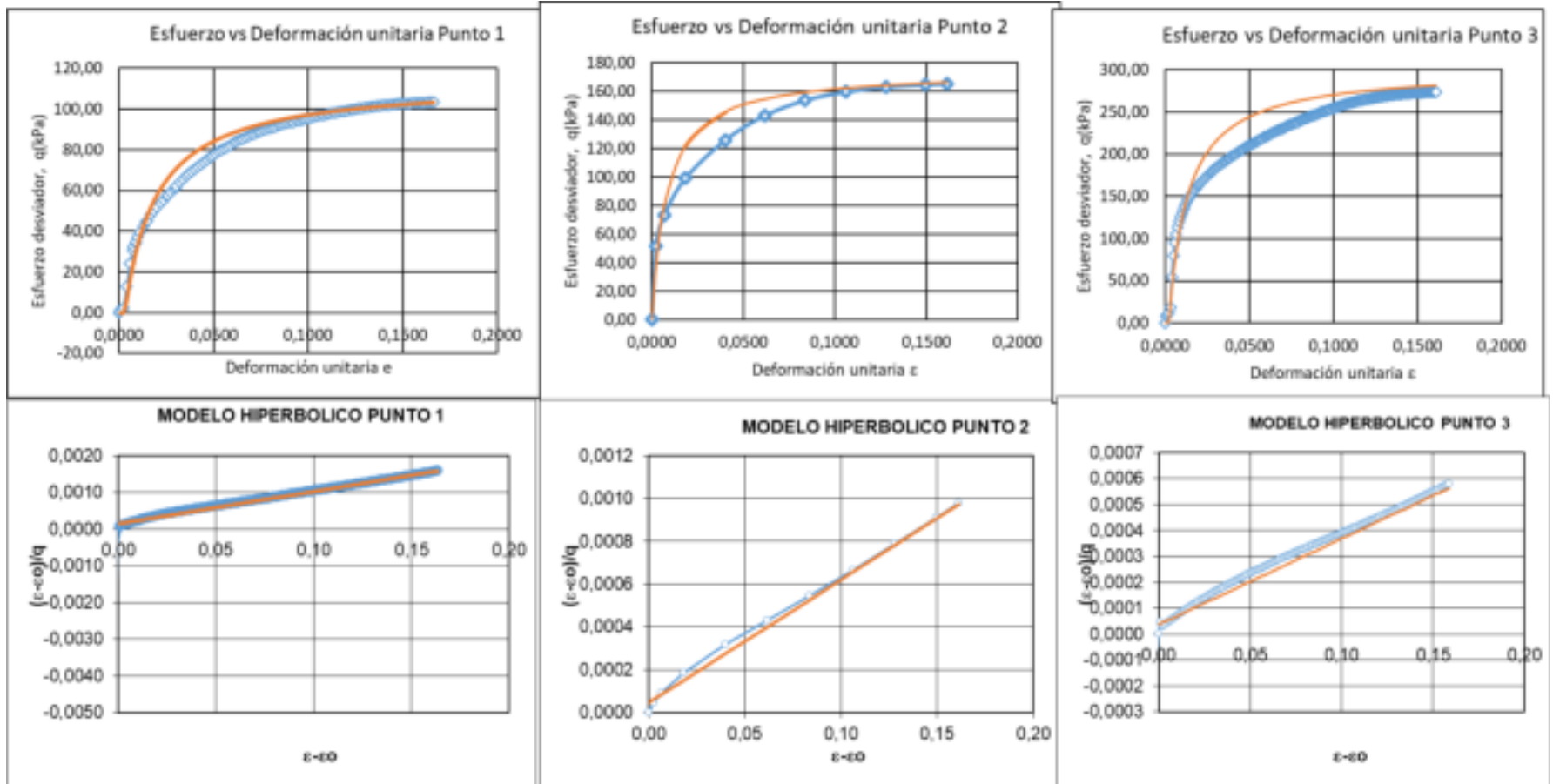


Figura 6.42 Relación esfuerzo y deformación y modelo hiperbolico por punto de carga modelo Duncan Chang zona piloto 1-TAB 1- M7 Y M8



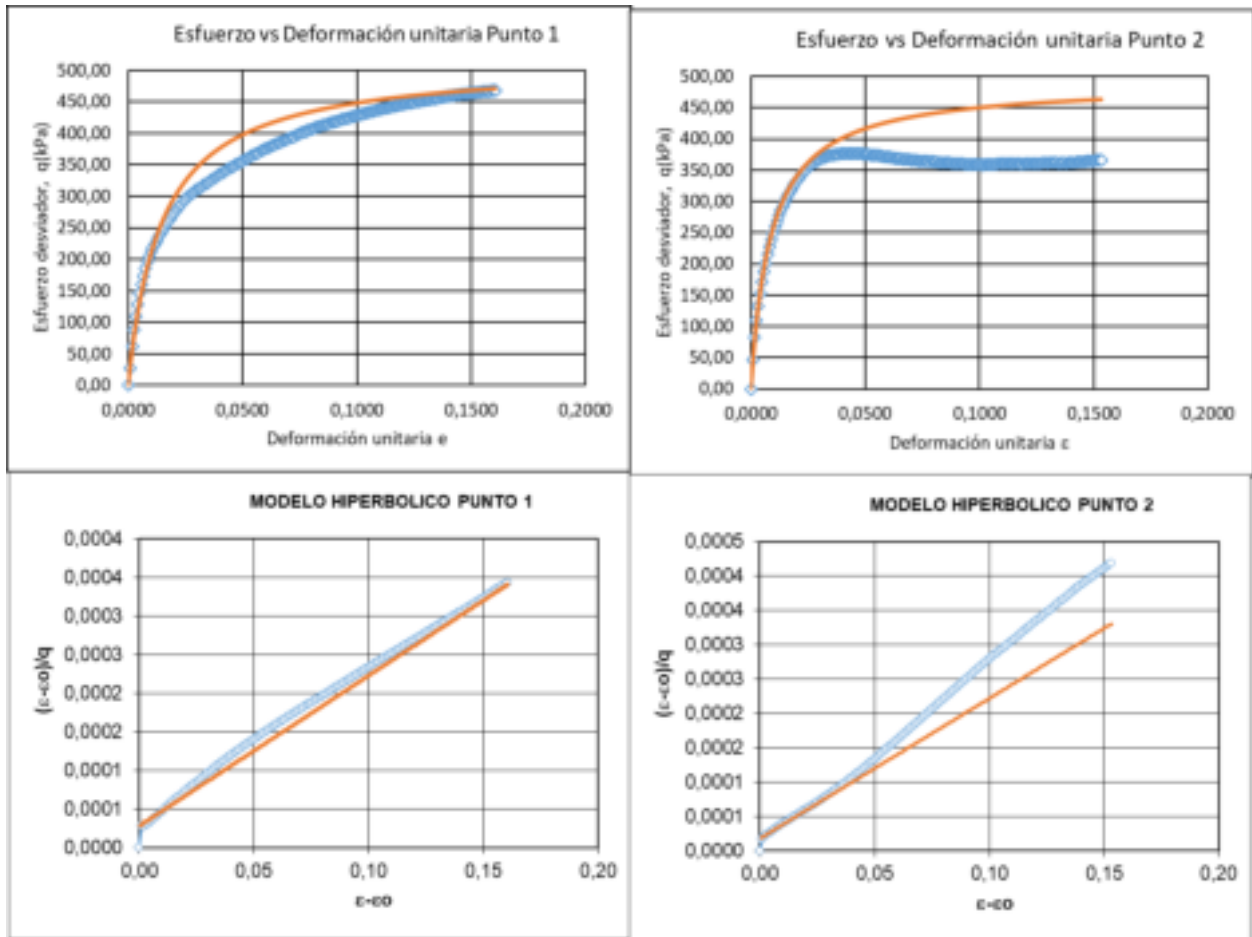


Figura 6.43 Relación esfuerzo y deformación y modelo hiperbolico por punto de carga modelo Duncan Chang zona piloto 1-TEB 3- TAB 1- M6 y M7

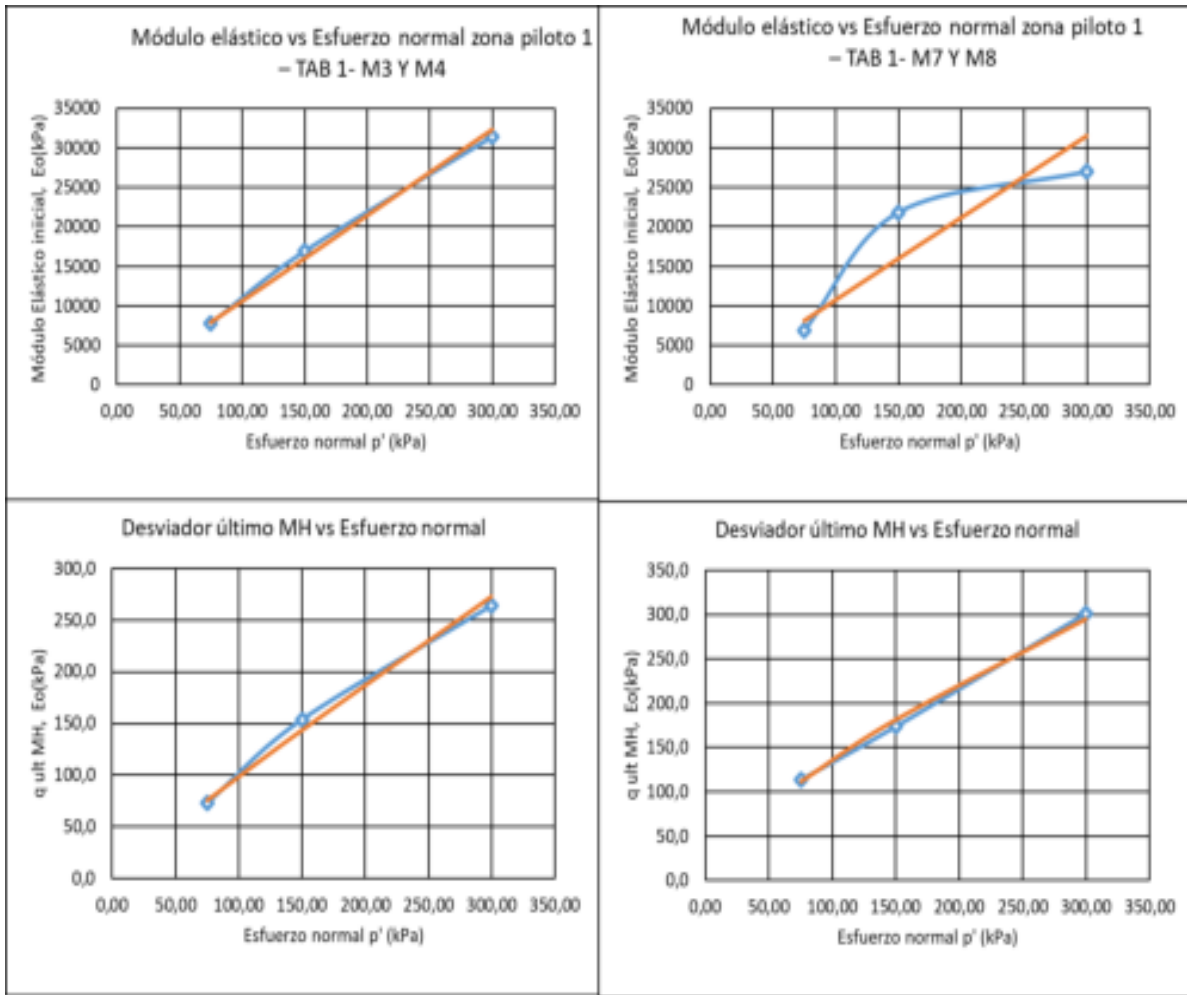


Figura 6.44 Relación entre el módulo elástico y el esfuerzo normal modelo Duncan Chang integrado zona piloto 1-TAB 1

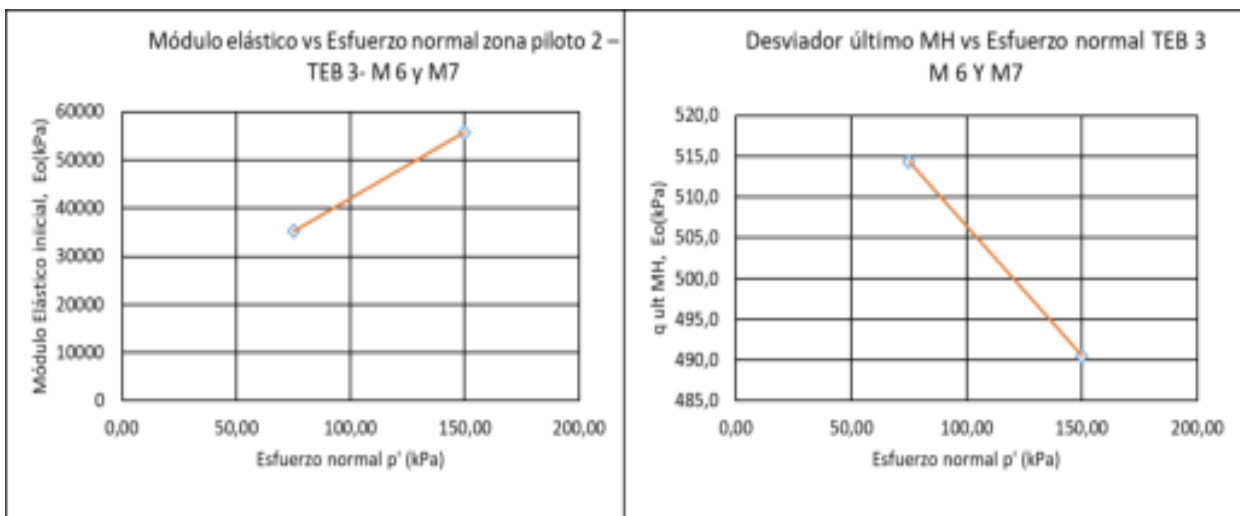


Figura 6.45 Relación entre el módulo elástico y el esfuerzo normal modelo Duncan Chang integrado zona piloto 2- TEB 3

### **6.3 Discusión general y conclusiones**

En los capítulos previos se ha presentado en forma resumida cada una de las partes de la investigación y un resumen de sus resultados. Este capítulo presenta las conclusiones producto del análisis y discusión de los resultados a nivel de laboratorio producto de información primaria y secundaria, a partir de los cuales se presentan las siguientes conclusiones respecto su origen geológico y de las propiedades físicas y estado de esfuerzos por zona piloto:

#### **6.3.1 Origen geológico y propiedades físicas básica**

1. Zona Piloto 1 - Sabana de Bogotá (municipio de Tabio): se trata de suelos de origen lacustre, cuya UGS predominante corresponde a suelos transportados de la Formación Sabana (Stfla, Stfl), constituidos principalmente por arcillas de color gris y que pueden alcanzar hasta los 300 metros de profundidad (van der Hammen, 1998), asociados a geoformas del tipo planicies y deltas lacustrinos (Fpla) de morfología plana y aspecto aterrazado, localizados principalmente en áreas rurales del municipio de Tabio en el departamento de Cundinamarca con cobertura principal de pastos; en la zona predomina un clima frío seco a frío húmedo en algunos sectores (IGAC), con meteorización química moderada, altitud entre 2000 y 3000 msnm y temperaturas media entre 12 y 18 grados. El perfil promedio de los suelos estudiados está compuesto por alternancia de suelos arcillosos de plasticidad media, con suelos limo arenosos de baja plasticidad para profundidades entre 0 y 15 metros de profundidad media con dos niveles litológicos, el primero nivel A entre 0 y 5.0 metros en promedio y el segundo nivel litológico B entre 5 y 15 metros que se diferenciaron por el grado de consolidación de los materiales. Las principales propiedades físicas de los suelos analizados se describen enseguida:

En los niveles litológicos A y B, predominan los suelos arcillosos tipo CL, CH alcanzando en el nivel A un 82% del total, y en el nivel B un 68%, resultados obtenidos a partir de la clasificación de Casagrande, datos que fueron corroborados a partir de los estudios de DRX y FRX que identificaron la presencia para el sondeo S-2 de caolinitas en porcentajes que van de 14.6% a 19.6% (entre 8.0 y 13.0 metros)

en profundidad, así como moscovita entre 10.5% a 18.2%; igualmente para el sondeo TAB-1 se tiene la caolinita con porcentajes variables entre 7% a 18% disminuyendo levemente en profundidad y la moscovita entre 7.3 a 18.6%; para la zona piloto 1 no se identificó montmorillonita; el mayor porcentaje de elementos presentes está representado en óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), presentes comúnmente en el cuarzo y algunos minerales arcillosos como los indicados. En este caso la clasificación producto del sistema USCS generó resultados consistentes con los minerales arcillosos encontrados en las muestras analizadas.

Los suelos presentan altos contenidos de humedad y se acerca en la mayoría de los casos al límite líquido del suelo. El valor medio del índice de consistencia  $I_c$  en el nivel litológica A y B es de 0.80. Estos resultados muestran un suelo que se presenta mayormente consolidado a lo largo del perfil. Es decir, se trata de suelos sedimentarios ligeramente sobre consolidados a normalmente consolidados, disminuyendo el grado de sobreconsolidación con la profundidad.

2. Zona Piloto 2 - Quindío ( Montenegro – Tebaida sur occidente Armenia): Se trata de suelos de origen volcánico, cuya UGS predominante corresponde a piroclastos de caída ( $\text{Stv}_1$ ) con espesor promedio entre 3 y 20 metros, flujos volcánicos y suelo residual ( $\text{Stfv}+\text{Srv}$ ) que alcanzan entre 80 y 150 metros, del Glacis del Quindío o abanico del Quindío ( $\text{TQgq}$ ), conformados por depósitos de ceniza volcánica y flujos volcánicos que subyacen los depósitos de ceniza de granulometría fina a gruesa y composición heterogénea. Los suelos residuales producto de flujos volcánicos antiguos están constituidos principalmente por limos y arcillas limosas con esporádicos clastos; como principal geomorfología asociada se tienen los flujos de lahar ( $\text{Vfl.}$ ) de formas aterrazadas y lobuladas de gran extensión localizados principalmente en áreas rurales de los municipios de Montenegro, Tebaida y la zona sur occidental de Armenia en el departamento del Quindío con cobertura principal de cultivos de plátano, café, cacao y algunas zonas de pastos; en la zona predomina un clima medio húmedo (IGAC), con meteorización mecánica y química moderada, altitud entre 1000 y 2000 msnm y temperaturas media entre 18 y 24 grados. El perfil promedio de los suelos estudiados está compuesto por alternancia de suelos arcillo

limosos de plasticidad media a alta, para profundidades entre 0 y 15 metros de profundidad con dos niveles litológicos, el primero nivel A entre 0 y 5.0 metros en promedio y el segundo nivel litológico B entre 5 y 15 metros diferenciados por el grado de consolidación principalmente. Las principales propiedades físicas de los suelos analizados se describen enseguida:

Los suelos analizados son sobreconsolidados a lo largo de todo el perfil evaluado, sin embargo, se presenta un mayor grado de sobreconsolidación en superficie y disminuye en profundidad. El contenido de humedad es alto; por encima de los 10m, la humedad es cercana al límite plástico ( $IL=0$ ) y por debajo de los 10 m la humedad es cercana al límite líquido (índice de liquidez cercano a 1.0). En el nivel litológico A se tiene una media en el valor del LL de 51.14 e índices de plasticidad con una media de 13.09%; en la zona litológica B, se tiene una media en el valor del LL de 69.19% y un IP medio de 20.13%. Aunque los pesos unitarios presentan una variabilidad baja, entre 15.66 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico A, hasta 15.79 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico B; en cuanto a los valores de gravedad específica varían entre 2.74 en superficie para el nivel litológico A y 2.72 para el nivel litológico B. El valor medio del  $I_c$  en el nivel litológica A es de 0.61 y para el nivel B el valor medio del  $I_c$  es de 0.80.

Los ensayos químicos DRX y FRX desarrollados sobre las muestras tomadas en Montenegro y Tebaida, indican una presencia predominante de caolinitas en porcentajes que van de 17.5% a 30.2% en el nivel litológico A y entre 46% a 70.5 % en el nivel litológico B, seguido de cuarzo que alcanza el 15% y moscovita que alcanza en profundidad el 22%, se observa presencia de montmorillonita en porcentajes muy bajos menores al 2%. El análisis de los difractogramas presentados en el capítulo cinco de las muestras MN1-M4, MN1-M6, MN1-M8 y TEB3- M3, TEB3-M5, permiten asociar los resultados a la presencia de minerales amorfos tipo alófanas en las muestras estudiadas, dado el desorden visible en la estructura, y la amplitud que presentan las bandas en el difractograma las cuales son propias de la presencia de minerales arcillosos en las muestras.

En este caso la clasificación producto del sistema USCS no generó resultados consistentes con los minerales encontrados en las muestras analizadas producto de los ensayos DRX y FRX; es decir de acuerdo a la clasificación USCS se tienen texturalmente en el área principalmente materiales tipo limo (ML-MH); sin embargo la presencia de minerales de arcilla predominantemente a lo largo del perfil, indica la existencia de suelos arcillosos que pueden presentar alta floculación que lleva a una clasificación que no corresponde con el material presente y clasifican como limos. Los altos porcentajes de limos obtenidos en los ensayos no se deben solamente al contenido de los granos de materiales primarios de tamaño limo, sino especialmente, a los agregados de tamaño grande formados por la agrupación o floculación de arcillas. Se puede concluir entonces, que el perfil está compuesto predominantemente por arcillas de plasticidad media a alta.

3. Zona Piloto 3- Barranquilla- sector Loma Verde: Se trata de suelos de origen marino costero, sobre consolidados cuya UGS predominante corresponde a suelos residuales de la Formación Perdices (PgNgp) principalmente de tipo arcilloso asociados a llanuras costeras (Mllc) extensas planicies ligeramente onduladas cuya génesis está ligada a procesos fluvio marinos de sedimentación y erosión en el pasado reciente con espesor entre 3 a 30 metros distribuidos en zonas urbanas y suburbanas del municipio de Barranquilla, específicamente en el sector de Loma Verde, objeto de esta investigación. En la zona predomina un clima cálido seco (IGAC), altitud entre 0 y 1000 msnm y temperaturas media mayores a 24 grados. El perfil promedio de los suelos estudiados está compuesto por suelos arcillosos principalmente de plasticidad entre media a alta, para profundidades entre 0 y 15 metros de profundidad con dos niveles litológicos, el primero nivel A entre 0 y 5.0 metros en promedio y el segundo nivel litológico B entre 5 y 15 metros diferenciados por el grado de consolidación principalmente. Las principales propiedades físicas de los suelos analizados se describen enseguida:

En el nivel litológico A se tiene una media en el valor del LL de 68.16 e índice de plasticidad con una media de 41.58%; en la zona litológica B, se tiene una media en el valor del LL de 61.88% y un IP medio de 31.03%. Aunque los pesos unitarios

presentan una variabilidad baja, entre 18.58 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico A, hasta 18.69 kN/m<sup>3</sup> en el nivel litológico B; en cuanto a los valores de gravedad específica varían entre 2.79 en superficie para el nivel litológico A y 2.84 para el nivel litológico B. El valor medio del  $I_c$  en el nivel litológica A es de 0.66 y para el nivel B el valor medio del  $I_c$  es de 0.78. Estos resultados muestran un suelo que se presenta mayormente consolidado a lo largo del perfil aumentando en profundidad. Es importante observar como en los dos niveles litológicos el  $I_c$  es mayor de 0.4 y se acerca a 1, lo cual indica que los suelos ya han alcanzado en algunos casos la condición final de consolidación; esto especialmente en el nivel litológico B (mayor profundidad).

Como se observa de acuerdo con la clasificación obtenida tanto en el nivel A como en el nivel B, predominan los suelos arcillosos tipo CH, CL con un porcentaje total para el nivel litológico A 95% y para el nivel B de 91%. Los resultados de los ensayos DRX y FTIR existentes para determinar la presencia de minerales arcillosos en los suelos y algunos elementos predominantes asociados a silicatos, identificaron montmorillonita, sin embargo, la forma y amplitud de los picos que caracterizan este mineral, así como los patrones de difracción obtenidos luego de la calcinación del material indican la posible presencia de interestratificados tipo illita/montmorillonita, sin embargo, es difícil establecer su presencia por estar mezclados los materiales (Rodríguez, 2014).

En este caso la clasificación producto del sistema USCS generó resultados consistentes con los minerales encontrados en las muestras analizadas

### **6.3.2 Estado de esfuerzos y deformación**

#### **1. Ensayos de compresión simple**

Los ensayos de la zona piloto 1 – Sabana de Bogotá, definen valores de resistencia al corte no drenados bajos entre 10 y 40 kPa, mientras que los valores de resistencia al corte no drenado de las muestras de Quindío son moderados, variables entre 17 y 50 kPa, y finalmente los valores de

resistencia al corte no drenado de las muestras para la zona piloto 3- Barranquilla son altos y oscilan entre 46 y 908 kPa; estas diferencias de comportamiento se deben al grado de sobre consolidación de los suelos, y a posibles pérdidas de humedad previo a la realización del ensayos.

En lo referente a la rigidez del suelo, las muestras del sector Sabana, presentan un comportamiento muy rígido con una relación de módulos  $E_u/C_u=1918$ , para el caso de las muestras de Quindío, la rigidez es moderada, con valores  $E_u/C_u=868$  y para el caso de las muestras de Barranquilla, la rigidez es baja, con valores de  $E_u/C_u=61$

## 2. Ensayos de corte directo

Los ensayos de corte directo obtenidos se enmarcan en el comportamiento de suelos sobreconsolidados, el límite inferior corresponde a la zona de resistencia mínima para una condición de suelo no consolidado y los valores máximos, con valores un poco más dispersos corresponden a la condición de suelos sobreconsolidados. En el caso de Sabana los valores máximos de resistencia son poco dispersos mientras que, en los otros dos casos, los valores máximos son más dispersos, presentándose casos atípicos de valores picos que se salen de la tendencia normal; estos valores anómalos están relacionados con efectos de cementación inducida en las muestras por pérdida de humedad antes de ser ensayadas.

Para las tres zonas piloto el comportamiento de la cohesión tiene tendencia a aumentar en profundidad, siendo en los tres casos la cohesión residual más baja que la cohesión en condición pico con pendiente positiva, presentando la zona piloto 2 la pendiente más baja, nuevamente se resaltan los valores excepcionalmente altos que presenta la zona 3, que tal como se explicó previamente se pueden deber al tiempo durante el cual las muestras estuvieron almacenadas previo a la ejecución del ensayo que las llevó a pérdida de humedad.

En tanto que se tienen resultados bastante consistentes para la cohesión, los valores del ángulo de fricción pico y residual presentan comportamientos que muestran una tendencia a disminuir en profundidad en condición pico para las zonas 1 y 3 que presentan pendientes negativas, sin embargo para la zona piloto 2 el ángulo de fricción presenta un leve incremento con pendiente positiva para la condición pico, esto puede ser producto de la presencia de suelos con presencia de



materiales granulares tipo limo pero con alto contenido de minerales arcillosos que revela los valores de cohesión que oscilan entre 20 y 40 kPa para la zona 2.

Finalmente, este ensayo deja ver para la zona piloto 1 un comportamiento típicamente dúctil de ablandamiento por deformación en condición pico y residual, mientras que para los materiales de las zonas piloto 2 y 3 se presenta un comportamiento inicialmente frágil en condición pico, con un endurecimiento por deformación inicial en condición pico, que se convierte posteriormente en comportamiento dúctil en condición residual, típico de suelos con mayores niveles de sobreconsolidación.

### 3. Ensayos triaxiales

Los ensayos triaxiales se ajustaron al modelo de Duncan, encontrando una tendencia creciente del módulo de Corte inicial  $E$  con el esfuerzo de Confinamiento  $p$ . En el caso de la Formación sabana el módulo inicial  $E_0/p'$  oscila entre 100 y 116; en el caso del Quindío esta relación  $E_0/p'=1993$ . No se tienen datos para la zona piloto 3 producto de ensayos triaxiales.

#### 1. Compresibilidad del suelo

Para analizar la compresibilidad del suelo, se analizó la relación existente entre el Coeficiente de compresión  $C_c$  y el Coeficiente de recompresión  $C_r$ , datos obtenidos a partir de los resultados de los ensayos de consolidación unidimensional. Las zonas piloto 1 y 2 presentan coeficientes de recompresión bastante bajos y con una pendiente baja que indica que se tienen materiales con niveles de compresibilidad similares a lo largo del perfil aumentando progresivamente en profundidad; en el caso de Barranquilla se encuentra que la compresibilidad aumenta también en profundidad, pero el aumento en esta condición es más fuerte que en los casos anteriores, hecho que se ve fuertemente reflejado en la correlación que muestra el valor de  $C_r$  y  $C_c$ .

Del análisis de los esfuerzos efectivos y los esfuerzos de preconsolidación se pudo obtener los valores de la relación de sobrec consolidación a lo largo de todo el perfil del suelo en cada zona; como se puede observar en las tres zonas piloto los suelos se presentan sobreconsolidados a lo largo de todo el perfil evaluado, sin embargo, se tiene una muy alta dispersión en la zona piloto 2;

igualmente la zona piloto 3 presenta valores de sobre consolidación superiores a las zonas 1 y 2. Los suelos en las tres zonas se encuentran en proceso de consolidación en los estratos inferiores habiendo alcanzado ya una sobreconsolidación en superficie; la zona piloto 3 presenta un alto grado de sobreconsolidación a lo largo de todo el perfil.

### **6.3.3 Correlaciones de interés de las propiedades índice con propiedades esfuerzo - deformación de los suelos**

1. Como resultado del análisis de la relación entre el índice de Plasticidad y el ángulo de fricción tanto para la condición pico como residual contra los resultados obtenidos por Kenney en 1959 y Olson en 1974 (G441, 2004) que establece una línea de tendencia con base en el índice de plasticidad, da como resultado que las zonas piloto 1, 2 y 3 presentan una tendencia en el comportamiento en condición residual similar que se aproxima un poco a la línea de tendencia de Kenney, en donde se tiene una reducción de la resistencia al corte a medida que aumenta su plasticidad; sin embargo en condición pico las muestras de la zona 1 y 2 presentaron una tendencia al aumento de la resistencia con el aumento del índice de plasticidad en forma muy evidente en la zona 1 y con valores más bajos en la zona 2; al analizar los resultados en su conjunto, los especímenes de las zonas 2 y 3 muestran una tendencia a disminuir su resistencia con el aumento de la plasticidad. En general se asume que la resistencia al corte en condición residual puede generar un comportamiento frágil o dúctil de acuerdo con el grado de sobreconsolidación de los materiales. Los suelos de las zonas piloto 1 y 2 se alejan más de la línea de tendencia establecida por Kenney y Olson, hecho que puede ser atribuible a la composición mineralógica predominante de los suelos evaluados, dado que en las zonas 1 y 2 no se tiene presencia de montmorillonita, si de caolinita y moscovita y posiblemente minerales amorfos interestratificados en Quindío lo cual los aleja de esta tendencia, sin embargo, la existencia de montmorillonita e illita en los materiales de la zona piloto 3 genera el acercamiento a esta tendencia.
2. A partir de la relación entre  $C_r$  y  $C_c$  se pudo calcular el módulo restringido del suelo  $D'$  (Raba Moyano & Caicedo, 2012) y el módulo no confinado  $E_s'$ , para finalmente obtener el módulo no drenado  $E_u$ , que permitió establecer que los valores del módulo no

drenado Eu teóricos son bastante consistentes en las tres zonas piloto y muestran una tendencia ascendente en profundidad; en donde las relaciones obtenidas con base en las correlaciones teóricas , definen el alto rango de los valores estadísticos; este comportamiento puede estar asociado con reducción del módulo por la alteración de las muestras en el laboratorio por la manipulación; igualmente se tienen valores atípicos para la zona piloto 3 a más de 15.0 metros de profundidad.

3. Análisis de la actividad, colapsabilidad y potencial de expansión a partir de correlaciones con las propiedades índice de los suelos: con base en diferentes correlaciones semiempíricas de uso común en la práctica de la ingeniería se evaluaron comportamientos especiales de los suelos finos obteniendo los siguientes resultados: tanto la actividad como el potencial de colapso y potencial de expansión para la zona piloto 1 son bajos; los resultados de los análisis químicos son consistentes con los arrojados por las correlaciones, dando como mineral arcilloso predominante las caolinitas y moscovitas. Para la zona piloto 2 se presenta un suelo en superficie con potencial de colapso que en profundidad disminuye, aumentando el potencial de expansión; en la zona piloto 2 tanto para el nivel litológico A y B se presenta una baja actividad con presencia predominante de caolinita principalmente y algún porcentaje de moscovita producto del análisis de minerales arcillosos efectuados a las muestras; en este caso es importante anotar que se identificaron minerales amorfos interestratificados de los cuales no se tiene una determinación exacta, sin embargo, ellos pueden dar algunas connotaciones de comportamiento especial en profundidad.
4. Para el caso de la zona piloto 3, tanto en el nivel litológico A como en el nivel litológico B no se presenta potencial de colapso, pero si potencial de expansión que coincide con el contenido de minerales tipo montmorillonita e illita tanto en el nivel A como en el B. Es importante anotar que la actividad calculada a partir de la ecuación de Skempton, no da una buena correlación para el caso de la zona piloto 3.

**CAPITULO 7**  
**CONCLUSIONES**

## 7 CONCLUSIONES

En esta investigación que se presenta como tesis doctoral, se han estudiado suelos finos predominantemente arcillosos en tres zonas piloto en Colombia respecto de su comportamiento esfuerzo – deformación en zonas seleccionadas a partir de criterios asociados a la génesis de los materiales y condiciones geoclimáticas, para así establecer dos aspectos básicos en los análisis planteados: 1.) materiales de origen geológico diferenciado y 2.) materiales sometidos a cambios medio ambientales característicos diferenciales en cada zona. Lo anterior, con el fin de establecer si existen suficientes soportes conceptuales que permitan definir criterios de aplicabilidad de ensayos y modelos geotécnicos específicos que puedan ser usados en los suelos con base en su génesis y evolución.

La investigación desarrollada consta de las siguientes partes:

1. Selección e identificación de tres zonas piloto de estudio desde la megaescala hasta escala local a partir de sus características geológicas, geomorfológicas y geoclimáticas predominantes, a partir de la construcción de un modelo geológico- geomorfológico aplicable a los fines de esta investigación, seleccionando tres zonas con materiales de origen diferenciado: lacustre ( un sector de Sabana de Bogotá, zona piloto 1), volcánico ( un sector del departamento de Quindio- Zona piloto 2) y marino costero ( un sector del municipio de Barranquilla, zona piloto 3) con base en criterios geomorfoestructurales y morfogenéticos.
2. Caracterización geomecánica de los suelos identificados en las zonas piloto seleccionados a partir de criterios de comparabilidad, con el fin de disminuir las incertidumbres en los resultados y permitir la comparabilidad de los resultados obtenidos, a la luz de la información geotécnica obtenida y de la aplicación de modelos para análisis prospectivos del comportamiento de los suelos. En esta caracterización se incluyeron análisis a nivel de macroestructura y microestructura, aplicando ensayos de laboratorio físicos, mecánicos y químicos mediante análisis en estado crítico, sobre muestras seleccionadas y recuperadas de trabajos de exploración directa realizados en el curso de la investigación, así como análisis de información producto de ensayos existentes obtenidos a partir de información secundaria.

3. Estudio de las propiedades deformacionales y resistentes de los suelos estudiados en las tres zonas piloto, en estado crítico bajo condiciones de carga comparables con el uso de diferentes técnicas de laboratorio usuales en la práctica convencional de la ingeniería. Simulación numérica tenso-deformacional empleando los modelos: Mohr-Coulomb, Cam Clay, Duncan Chang y Modelo francés adaptado.

Producto del análisis integral de toda la información presentada a partir de las actividades indicadas se establecen las siguientes conclusiones generales:

4. Se logró la identificación de criterios de selección de las zonas de estudio , los cuales parten del conocimiento geológico geomorfológico en la megaescala, pasando por el análisis de los datos de información de comportamientos de materiales geológicos particulados en la macroescala, hasta alcanzar un nivel de análisis de la microestructura o fábrica de los suelos finos, afectados por condiciones exógenas asociadas a diversas condiciones climáticas; se obtuvo resultados coherentes que permiten hacer análisis comparativos de comportamiento geotécnico a nivel local y puntal.
5. El modelo geológico – geomorfológico propuesto, permite asociar la génesis de los suelos con la existencia de suelos finos predominantemente arcillosos, desde un análisis integrado que relaciona diferentes escalas espacio – temporales y la identificación coherente de áreas de estudio geotécnico local y puntal a nivel de comportamiento geomecánico.
6. El análisis comparativo de suelos finos predominantemente arcillosos en zonas con génesis bien diferenciada presentó un gran reto, asociado a los costos que conlleva la exploración geotécnica, cual fue la identificación de puntos de exploración geotécnica a partir de la propuesta de modelo geológico – geomorfológico – geotécnico, la cual arrojó resultados positivos, mostrando en las tres zonas evaluadas perfiles de suelos predominantemente arcillosos hasta

aproximadamente 15 metros de profundidad, con características fisiográficas similares que pudieronn ser comparables a nivel de comportamiento geomecánico.

7. La aplicación de diferentes herramientas y técnicas de laboratorio, las cuales incluyen el conocimiento desde la ingeniería geotécnica y la geología, la geomorfología, análisis básicos de composición de los suelos, análisis geoestadísticos y análisis con uso de sistemas de información geográfico, permitió generar resultados correlacionables y de mayor confiabilidad a nivel espacio temporal de los polígonos de estudio.
8. Se aplicaron técnicas de laboratorio convencionales en la práctica de la ingeniera para la caracterización esfuerzo – deformación de los suelos analizados, lo cual se complementó con información existente del mismo tipo a nivel de la macroestructura, complementando los análisis de composición mineralógica para la identificación de minerales arcillosos.
9. Se pudo comprobar que, en suelos de origen volcánico, especialmente, el uso de técnicas de laboratorio convencionales para identificación de propiedades índice, no permite establecer una identificación real de suelos arcillosos, y que es necesario el uso de análisis químicos adicionales con el fin de tener una identificación veraz del tipo de suelos finos presentes. Para el caso de los suelos lacustres y volcánicos, se pudo identificar como minerales arcillosos predominantes la caolinita y la moscovita, sin embargo, la presencia de minerales amorfos en los suelos volcánicos genera una diferencia importante en comportamiento geomecánico.
10. Los materiales de origen volcánico analizados, muestran alto potencial de colapso, identificable a partir de correlaciones semiempíricas con sus propiedades índice, las cuales pueden estar asociadas con la presencia de minerales arcillosos amorfos cuya existencia se pudo establecer a partir del análisis de ensayos DRX y FRX, que, sin embargo, no alcanzaron a identificar el tipo de mineral. Este mismo tipo de minerales se identificaron en los suelos marinos analizados, sin que se haya diferenciado el tipo de mineral.

11. Los suelos volcánicos y marinos presentaron una tendencia a presentar una falla frágil en condición pico y posteriormente una falla dúctil en condición residual; caso contrario de los suelos lacustres que presentaron una tendencia a falla dúctil tanto en condición pico como residual.
12. Aunque los suelos analizados en las tres zonas son sobreconsolidados, en los tres casos en superficie, el grado de sobreconsolidación es superior y se presentan ligeramente sobreconsolidados en profundidad, causa que puede estar asociada a las condiciones de confinamiento de los suelos en profundidad; solo en el caso de los suelos marinos se tiene a lo largo de todo el perfil alta sobreconsolidación.
13. Es también importante observar que, en general las correlaciones de los índices de consistencia desarrolladas por diferentes autores con las propiedades esfuerzo - deformación de los suelos generan resultados consistentes para los suelos lacustres no así para los suelos volcánicos y marinos, en donde se presenta una muy alta dispersión de los resultados que no facilita plantear una tendencia de comportamiento.
14. Las modelizaciones llevadas a cabo mediante el programa de elementos finitos Plaxis, corrobora que, los parámetros adoptados son adecuados, y que la metodología para su obtención es válida para los modelos constitutivos empleados (Mohr-Coulomb, CAM CLAY Duncan CHANG; sin embargo, el modelo Duncan Chang generó mejores resultados para los suelos volcánicos y marinos, lo que puede estar asociado a su mayor grado de consolidación.
15. El uso del modelo adaptado francés genera resultados aceptables especialmente para los suelos lacustres, y en algunos casos para los suelos marinos. Los resultados arrojados para los suelos volcánicos muestran poca aplicabilidad de estas correlaciones.



16. Los modelos constitutivos ofrecen una modelización razonable de los principales elementos del comportamiento tensión desviadora-deformación observado en los ensayos triaxiales CU realizados especialmente en la zona elástica, luego de sobrepasar este límite en general ningún modelo logra un buen ajuste con las curvas experimentales
17. Aunque los modelos Mohr Coulomb y Cam Clay aplican para suelos NC, se obtuvo buenos resultados para los suelos lacustres que tienen un grado ligero de sobreconsolidación y un comportamiento que se ajusta más al modelo elasto plástico; para los suelos volcánicos el ajuste más adecuado se logró con el modelo hiperbólico Duncan Chang.
18. En general los modelos constitutivos presentan un buen ajuste en el rango de comportamiento elástico de los materiales; por encima de este rango el comportamiento se aparta de los modelos, especialmente para los de origen marino y volcánico.
19. Dado el buen conocimiento que se tiene en Colombia respecto de la génesis de los suelos, así como la existencia de cartografía de Unidades Geológicas superficiales y mapas geomorfológicos que permiten identificar geoformas características que contemplan rasgos genéticos predominantes, se puede, a partir de los resultados obtenidos, plantear estudios complementarios en polígonos fácilmente identificables a partir del modelo geológico – geomorfológico – geotécnico propuesto, esto con el fin de identificar zonas que requieren ensayos especiales para la microfábrica de los suelos y que es posible incluir en la práctica convencional de la ingeniería.
20. Los resultados anómalos en resistencia y deformación asociados a propiedades de posible colapso de los suelos volcánicos requieren análisis de identificación de minerales amorfos, los cuales no se pudieron identificar a partir de ensayos básicos de difracción por rayos X o fluorescencia con el fin de iniciar estudios que permitan establecer tendencias específicas para este tipo de suelos.

21. El método francés permite a partir de ensayos básicos convencionales identificar posibles comportamientos esfuerzo – deformación que ajustan con las tendencias de materiales finos arcillosos para suelos lacustres, no ocurre igual para suelos volcánicos y marinos, los cuales requieren estudios complementarios para establecer tendencias de comportamiento mecánico.

Finalmente, es importante anotar que el desarrollo del presente trabajo, representa un avance en la aplicación de estudios de comportamiento geomecánico de suelos en la práctica convencional de la ingeniería, que se relacionen en forma directa con su génesis, y que involucra trabajos interdisciplinarios, los cuales llevan a la necesidad de desarrollar además de los análisis convencionales, estudios de la microfábrica especialmente para suelos de origen volcánico, que han sido afectados a lo largo de su historia y evolución por procesos exógenos y endógenos intensos, los cuales han modificado su microestructura y por lo tanto su comportamiento.

Debido a la amplitud del tema tratado y los múltiples y variados orígenes de los suelos finos predominantemente arcillosos, se requiere continuar con trabajos para mejorar el conocimiento completo de suelos que presentan comportamientos especiales, más que anómalos y que afectan las obras de ingeniería; queda un vacío importante relacionado con materiales marino costeros, cuyo origen primario puede estar también asociado a actividad volcánica y por lo cual presentan bastantes similitudes en comportamiento esfuerzo – deformación con los suelos volcánicos. Una de las variables de difícil control en esta investigación fue el análisis y calificación de los datos provenientes de información secundaria, sin embargo, dados los altos costos de los trabajos de exploración, muestreo y laboratorio, especialmente a escalas media y regional, es de suma importancia el uso de la información geotécnica existente, especialmente para la aplicación de este tipo de estudios en la complementación de normas de construcción.

Queda también demostrada la necesidad de incluir estudios químicos básicos orientados a conocer como mínimo la composición mineralógica de los suelos, los cuales se apliquen para suelos arcillosos de diverso origen, especialmente sobre materiales en los que se prevé a partir de su origen, la existencia de minerales arcillosos amorfos, que presentan mayor dificultad para su identificación. Igualmente se requiere dicha identificación con el fin de estudiar a que

comportamientos anómalos o especiales se puede asociar su existencia en los suelos arcillosos. Esta misma necesidad se puede generalizar, para materiales que tengan minerales que den alta cementación a los suelos, lo cual lleva a cambios fundamentales en la respuesta en resistencia y deformación de los mismos.

Importante también abordar un tema de alta importancia en el estudio de suelos arcillosos, y es que la mayor parte de los estudios en estos materiales se han direccionado a los cambios de volumen asociados a procesos expansivos; sin embargo, se puede concluir de los resultados obtenidos que este tipo de suelos presentan otros comportamientos que se salen del rango elastoplástico convencional y que requieren de especial atención y estudios específicos. En este sentido, los futuros trabajos pueden estar enfocados tanto en el campo de la experimentación, como en los planteamientos de las bases teóricas y la modelización.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Aitchison, G. D. (1973). Structurally Unstable Soils. State of the Arts. *8<sup>o</sup> International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engeneering*, 161–190.
- Allue A., L. (1990). *Atlas fitoclimático de España: taxonomías* (INIA (ed.)).
- Alonso, E. E., Gens, A., & Hight, D. W. (1987). *Special problems soils. General report*. 1087–1146.
- Alonso, E. E., & Pineda, J. A. (2006). *Weathering and degradation of shales: experimental observations and models of degradation Meteorización y degradación de rocas arcillosas: observaciones experimentales y modelos de degradación*.
- Alonso, E. E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54(1), 173–183.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00079-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00079-4)
- Aranda, J. . (1991). Agrietamiento en Aguascalientes. *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, 63–65.
- Arrieta, A. (2005). *Asesoría Geotécnica Parrish S.A. Urbe Innv/PID S.A. CARSON INMOBILIARIA URBANIZACIÓN CAMPOALEGRE - ZONA ALTERADA*.
- Ávila, G. E. (1998). Instrumentación piezométrica para análisis de subsidencia en Santafé de Bogotá. *VII Congreso Colombiano de Geotécnia*.
- Ávila, G. E. (2003). *Registro de variación de los niveles piezométricos en al ciudad de Bogotá (1998-2002)*.
- Ávila, G. E. (2004). Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. *Estudio de La Retracción y El Agrietamiento de Arcillas. Aplicación a La Arcilla de Bogotá*, 299.  
<http://www.tesisenred.net/handle/10803/6233%0Ahttp://upcommons.upc.edu/handle/2117/93545>
- Ávila, G., Ledesma, A., & Lloret, A. (2002). *Measurement of frecture mechanics parameters for the análisis of cracking in cleyey soils*. 547–552.
- Bache, B. W. (1990). G. Sposito 1989. *The Chemistry of Soils*. xiii + 277 pp. Price £25.00 (hard covers). New York, Oxford: Oxford University Press. ISBN 0 19 504615 3.

*Geological Magazine*, 127(2), 190–191. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0016756800014059>

- Barbour, S. L., & Yang, N. (1993). A review of the influence of clay–brine interactions on the geotechnical properties of Ca-montmorillonitic clayey soils from western Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), 920–934. <https://doi.org/10.1139/t93-090>
- Berdugo, I., Alonso, E., Romero, E., Gens, A., & Albis, M. (2010). *A review of expansive phenomena in Wagenburg North Tunnel*.
- Berre, T., & Bjerrum, L. (1973). *Shear strength of normally consolidated clays*. 39–49.
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos - Eduardo Besoain - Google Libros*. 60, 1216.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yhwkBaQ\\_wgC&oi=fnd&pg=PA5&dq=formacihttps://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pfL7oUpz11QC&oi=fnd&pg=PA156&dq=Las+arcilla&ots=FkXqFM9LLv&sig=nJVy5JbhLaAVrdeolUm6W0T4RC4#v=onepage&q=Las+arcilla&f=true](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yhwkBaQ_wgC&oi=fnd&pg=PA5&dq=formacihttps://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pfL7oUpz11QC&oi=fnd&pg=PA156&dq=Las+arcilla&ots=FkXqFM9LLv&sig=nJVy5JbhLaAVrdeolUm6W0T4RC4#v=onepage&q=Las+arcilla&f=true)
- Biarez, J., & Hicher, P.-Y. (1993). *Elementary mechanics of soil behaviour: saturated remoulded soils*. AA Balkema.
- Bolt, G. H. (1955). Analysis of the validity of the Gouy-Chapman theory of the electric double layer. *Journal of Colloid Science*, 10(2), 206–218.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0095-8522\(55\)90027-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0095-8522(55)90027-1)
- Bolt, G. H. (1956). Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays. *Géotechnique*, 6(2), 86–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1956.6.2.86>
- Borja, R. I., & Lee, S. R. (1990). Cam-Clay plasticity, Part 1: Implicit integration of elastoplastic constitutive relations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 78(1), 49–72. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7825\(90\)90152-C](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7825(90)90152-C)
- Burland, J. B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3), 329–378. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.329>
- Caicedo, B., Vesga, L., & Mesa, L. (2003). Deep Cracking in “ Sabana de Bogotá ” Clay Agrietamiento Profundo en la Arcilla “ Sabana de Bogotá .” *ResearchGate*, 1(June

- 2003), 7. <https://www.researchgate.net/publication/303446192>
- Calabresi, G., & Scarpelli, G. (1985). EFFECTS OF SWELLING CAUSED BY UNLOADING IN OVERCONSOLIDATED CLAYS. PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, SAN FRANCISCO, 12-16 AUGUST 1985. *Publication of: Balkema (AA)*.
- Calderón, Y., & Ruiz Taborda, A. A. (2004). *Proyecto compilación y levantamiento de la información geomecánica : Zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá - hidrología y clima*. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS),. [https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=Zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá %3A Hidrología y clima](https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=Zonificación%20geomecánica%20de%20la%20Sabana%20de%20Bogotá%20Hidrología%20y%20clima). Volumen VI
- Cano, V. G., & Márquez, J. O. (2014). *Espectroscopía Raman: Fundamento y aplicaciones*. CAR. (2018). *Actualización POMCA río Bogotá: Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica*. 2018–3, 55.
- Carvajal, J. H. (2002). *Caracterización de la metodología geomorfológica adaptada por Ingeominas*.
- Casagrande, A. (1937). *Seepage through dams*.
- Chacón, G. (2004). CALIBRACIÓN DE MODELOS CONSTITUTIVOS EN ARCILLAS DE BOGOTÁ. *In Universidad de Los Andes*.
- CIOH. (2010). *Climatología de los principales puertos del caribe Colombiano - Barranquilla*.
- Collins, K., & McGown, A. (1974). The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Géotechnique*, 24(2), 223–254.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1974.24.2.223>
- Costa-Filho, L. M. (1984). A note on the influence of fissures on the deformation characteristics of London clay. *Géotechnique*, 34(2), 268–272.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1984.34.2.268>
- Cotecchia, F., & Chandler, R. J. (1997). The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay. *Géotechnique*, 47(3), 523–544.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.3.523>
- Cuccovillo, T., & Coop, M. R. (1997). Yielding and pre-failure deformation of structured

- sands. *Géotechnique*, 47(3), 491–508. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.3.491>
- Das, B. M. (1983). *Advanced Soil Mechanics* (Universidad de Texas (ed.)). MacGrawHill.
- Di Maio, C. (1996). Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. *Géotechnique*, 46(4), 695–707. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.4.695>
- Di Maio, C., Santoli, L., & Schiavone, P. (2004). Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mechanics of Materials*, 36(5), 435–451. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(03\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(03)00070-X)
- Driscoll, R. (1983). The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Géotechnique*, 33(2), 93–105. <https://doi.org/10.1680/geot.1983.33.2.93>
- Duncan, J. M., & Chang, C.-Y. (1970). Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1629–1653. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001458>
- Eagleman, J. R., & Lin, W. C. (1976). Remote sensing of soil moisture by a 21-cm passive radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 81(21), 3660–3666.
- EGIS STEER. (2021). *Producto 4 Estudios y Diseños de Pre-factibilidad Entregable 5 . 1 Revisión Geotécnica*. 66.
- Eslava, J. A. (1993). Climatología y diversidad climática de Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 18(71), 507–538.
- Fookes, P. G., & Denness, B. (1969). Observational Studies on Fissure Patterns in Cretaceous Sediments of South-East England. *Géotechnique*, 19(4), 453–477. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.4.453>
- Forero-Dueñas, C. A. (1998). *Characterisation of a silica-gel as a geotechnical cement*. Imperial College of Science.
- Fredlund, D. ., Xing, A., Fredlund, M. ., & Barbour, S. . (1995). The relationship of unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 32.
- G441. (2004). *Correlations Between Soil Plasticity and Strength Parameters*. [https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/Soil Plasticity vs Strength](https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/Soil%20Plasticity%20vs%20Strength)

Parameters.pdf

- Gens, A. (2005). *GEOTECNIA: UNA CIENCIA PARA EL COMPORTAMIENTO DEL TERRENO*.
- Gens, A. (2010). Soil–environment interactions in geotechnical engineering. *Géotechnique*, 60(1), 3–74. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.109>
- Gens, A., & Alonso, E. E. (1992). A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), 1013–1032. <https://doi.org/10.1139/t92-120>
- González Iregui, H., & Núñez Tello, A. (1991). *Mapa geológico generalizado del departamento del Quindío* : Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS).  
<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=130100101005017457000000000>
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. In *Editorial Pearson Education, Madrid*.
- Grabowska-Olszewaska, B., Osipov, V., & Sokolov, V. (1984). *Atlas of microstructure of clay soils*. Warszawa. 414.
- Guerrero, C. C., & Cruz Velasco, L. G. (2018). Estudio experimental de clasificación de suelos derivados de cenizas volcánicas en el suroccidente colombiano con el método SUCS, el AASHTO y un nuevo método de clasificación de suelos . In *Ingeniería y Desarrollo* (Vol. 36, pp. 378–397). scieloco .
- Guimarães, L. (2002). *Análisis multi-componente no isoterma en medio poroso deformable no saturado*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Helwany, S. (2007). *Applied soil mechanics with ABAQUS applications*. John Wiley & Sons.
- Herle, I., & Kolymbas, D. (2004). Hypoplasticity for soils with low friction angles. *Computers and Geotechnics*, 31(5), 365–373.
- Holtz, W. G. (1983). The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clays in the United States of America. *Géotechnique*, 33(2), 159–163.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1983.33.2.159>
- Huat, B. B., Noorzaei, M. S., Jaafar, K., Ti, S., & See Sew, G. (2015). A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application. *EJGE*, 14, 1–18.



- IGAC. (1997). Revista CIAF. *Revista CIAF*, 15(1).
- INGEOMINAS. (1997a). *Evaluación geotécnica de las laderas occidentales de Barranquilla Fase I*. <http://srv-sp1:55002/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=17579>
- INGEOMINAS. (1997b). *Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá. Versión año 1997*. <https://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=10514>
- INGEOMINAS. (1998). *Mapa Morfológico del Departamento de Cundinamarca a partir de imagenes de Satélite*. Gobernación de Cundinamarca.
- INGEOMINAS. (1999). *VOLUMEN II : ZONIFICACIÓN SISMOGOTÉCNICA INDICATIVA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE ARMENIA*.
- INGEOMINAS. (2001). *Geología de las planchas 16-17 Galerazamba y Barranquilla - Memoria explicativa*.
- INGEOMINAS. (2002). *Modelo Hidrológico Conceptual de la Sabana de Bogotá*.
- INGEOMINAS. (2004). *Cartografía Geológica Aplicada A la Zonificación Geomecánica de la Sabana de Bogotá, Volumen II*. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS),. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=ZONIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA SABANA DE BOGOTA>
- INGEOMINAS. (2005). *Zonificación Geomecánica del departamento del Quindío*.
- INGEOMINAS. (2010). Estudio geomorfológico del sector comprendido entre Bocatocino (Atlántico) y Ciénaga (Magdalena). *Boletín Científico CIOH*, 2(17), 140.
- INGEOMINAS. (2011). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa de las laderas occidentales de Barranquilla, departamento del Atlántico : informe final / Servicio Geológico Colombiano (SGC)*. [https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=49098&shelfbrowse\\_itemnumber=48445](https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=49098&shelfbrowse_itemnumber=48445)
- Justo, Á., & Morillo, E. (1999). Técnicas de difracción de rayos X para la identificación cualitativa y cuantitativa de minerales de la arcilla. *Ciencia y Tecnología de Materiales*, 2, 77–86. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/79501/4/Técnicas de difracción de rayos X.pdf>
- Kamine, & Ogata. (1995). Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*

*Geomechanics Abstracts.*

- Kolymbas, D. (2000). *Introduction to Hypoplasticity: Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling 1*. CRC Press.
- Kolymbas, D., Herle, I., & Von Wolffersdorff, P. A. (1995). Hypoplastic constitutive equation with internal variables. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 19(6), 415–436.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/nag.1610190604>
- Kondner, R. L., & Zelasko, J. S. (1963). *A Hyperbolic Stress-strain Formulation for Sands*. Northwestern University. <https://books.google.com.co/books?id=XLbJHAAACAAJ>
- Konrad, J.-M., & Ayad, R. (1997). Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 929–942.  
<https://doi.org/10.1139/t97-063>
- Koppen, W. (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 64, 193–203.
- Krieg, S. (2000). *Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei*. Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik.  
<https://books.google.com.co/books?id=2BC6HAAACAAJ>
- Lade, P. V. (2005). Overview of Constitutive Models For Soils. In *Calibration of Constitutive Models* (pp. 1–34). [https://doi.org/doi:10.1061/40786\(165\)1](https://doi.org/doi:10.1061/40786(165)1)
- Laguna, O. H. (2007). *Efecto del contenido esmectítico en procesos de pilarización de minerales arcillosos provenientes de la Cordillera Central de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics*. Wiley.  
<https://books.google.com.co/books?id=YPRWPwAACAAJ>
- Lee, F. H., Lo, K. W., & Lee, S.-L. (1988). Tension Crack Development in Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114, 915–929.
- Leroueil, S., Roy, M., Rochelle, P. La, Brucy, F., & Tavenas, F. A. (1979). Behavior of Destructured Natural Clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(6), 759–778. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000823>

- Leroueil, S., & Vaughan, P. R. (1990). The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40(3), 467–488.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.467>
- Liu, M. D., & Carter, J. P. (2002). A structured Cam Clay model. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6), 1313–1332. <https://doi.org/10.1139/t02-069>
- Loboguerrero, A. (1987). La geología en Colombia. *Revista AVANTE*, 9, 11.  
<http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/20.500.11762/18905/1/1187.pdf>
- Maeda, T., Takenaka, H., & Warkentin, B. P. (1977). Physical properties of allophane soils. *Avances Agronomy*, 29, 229–264.
- Mašín, D. (2007). A hypoplastic constitutive model for clays with meta-stable structure. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 363–375. <https://doi.org/10.1139/t06-109>
- McLaughlin, D. H., & Arce, M. (1975). *Mapa geológico del cuadrángulo Zipaquira (K-11), Colombia* (p. 1 carte). U.S. Geological Survey.
- Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of soil behaviour* (I. John Wiley & Sons (ed.); 2nd ed.).
- Mitchell, J. K., Campanella, R. G., & Singh, A. (1968). Soil Creep As A Rate Process. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(1), 231–253.  
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001085>
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Vol. 3). John Wiley & Sons New York.
- Montero, J., Torres Suarez, M. C., Torres Suarez, M., Saavedra, C., & Delvalle, R. (2013). Rocas Lodosas Cordillera Oriental de Colombia Mudrocks from The Colombian Eanstern Mountain.Range. *Boletín Colombiano de Geotecnia*.
- Moore, D. M., Reynolds, R. C., & Reynolds, R. C. (1989). *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press.  
<https://books.google.com.co/books?id=-l3wAAAAMAAJ>
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>

- Mora González, O. A. (2011). *Herramientas Conceptuales para el Estudio del Proceso de Evaporación Acoplado con el Comportamiento Mecánico de los Suelos*. Pontificia Universidad Javerina.
- Mora, O., & Moya, J. (2006). *Revisión del marco de referencia conceptual para el estudio de fenómenos de remoción en masa*.
- Moreno-Maroto, J. M., & Alonso-Azcárate, J. (2018). What is clay? A new definition of “clay” based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. *Applied Clay Science*, 161, 57–63.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.011>
- Moreno-Maroto, J. M., Alonso-Azcárate, J., & O’Kelly, B. C. (2021). Review and critical examination of fine-grained soil classification systems based on plasticity. *Applied Clay Science*, 200, 105955.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105955>
- Moreno-Maroto, J. M., & Azcárate, J. (2017). Plastic Limit and Other Consistency Parameters by a Bending Method and Interpretation of Plasticity Classification in Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 40, 467–482.  
<https://doi.org/10.1520/GTJ20160059>
- Morris, P. H., Graham, J., & Williams, D. J. (1992). Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 263–277. <https://doi.org/10.1139/t92-030>
- Murayama, S., & Shibata, T. (1958). On the Rheological Characters of Clay Part 1. *Bulletins-Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 26, 1–43.
- Murillo, R., Morales, Monroy, R., & Hernández, A. (1991). Agrietamiento lacustre al oriente de la ciudad de México. *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, 79–94.
- Nieto Leal, A. (2007). *Modelación del Comportamiento del Suelo Utilizando el Modelo Constitutivo MIT S1*. Universidad de los Andes.
- Olson, R. E., & Mesri, G. (1970). Mechanisms Controlling Compressibility of Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(6), 1863–1878.  
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001475>
- Papadakis, J. (1962). *Avances recientes en el estudio hidrico de los climas*:

- (*evapotranspiración, índice hidrico, lluvia de lavado, estaciones seca y húmeda, régimen hidrico*). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.  
<https://books.google.com.co/books?id=UrVmnQEACAAJ>
- Parra, E., & Mejía, I. (1999). *Efectos del sismo del 25 de enero de 1999 en el Sur - Este del Departamento del Quindío*.
- Peltier, L. C. (1973). *The Geographic Cycle in Periglacial Regions as it is Related to Climatic Geomorphology BT - Climatic Geomorphology* (E. Derbyshire (ed.); pp. 131–152). Macmillan Education UK. [https://doi.org/10.1007/978-1-349-15508-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-349-15508-8_9)
- Pérez Rodríguez, J. L. (1968). *Constitución y Propiedades Físicoquímicas de las Arcillas de Suelos del Valle del Guadalquivir*. Universidad de Sevilla.
- Picarelli, L., Olivares, L., Di Maio, C., Silvestri, F., Nocera, S., & Urciuoli, G. (2000). Structure properties and mechanical behaviour of the highly plastic intensely fissured Bisaccia clay shale. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 2, 947–982.
- Pinzón Bonilla, D., & Garzón García, L. C. (2018). Compresibilidad, Sensibilidad y Colapso en Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas en la Ciudad de Pereira. *World Development*, 1(1), 1–15.  
<http://www.fao.org/3/I8739EN/i8739en.pdf>  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.adolescence.2017.01.003>  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.childyouth.2011.10.007>  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23288604.2016.1224023>  
<http://pdx.sagepub.com/lookup/doi/10>
- Polidori, E. (2003). Proposal for a new plasticity chart. *Géotechnique*, 53(4), 397–406.  
<https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.4.397>
- Polidori, E. (2007). Relationship Between the Atterberg Limits and Clay Content. *Soils and Foundations*, 47(5), 887–896. <https://doi.org/10.3208/sandf.47.887>
- Polidori, E. (2009). Reappraisal of the Activity of Clays. Activity Chart. *Soils and Foundations*, 49(3), 431–441. <https://doi.org/10.3208/sandf.49.431>
- Polidori, E. (2015). Proposal for a New Classification of Common Inorganic Soils for Engineering Purposes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6), 1569–1579.  
<https://doi.org/10.1007/s10706-015-9922-4>

- Raba Moyano, M. A., & Caicedo, B. (2012). *CARACTERIZACION FISICA Y GEOMECANICA DE SUELOS LACUSTRES EN LA CIUDAD DE BOGOTA DESDE EL CONTEXTO DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE SUELOS BLANDOS*.
- Ramírez-Builes, V. (2009). Las arcillas alófanas y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo. *Unisarc*, 7(1), 30–38.  
[https://www.researchgate.net/publication/341726619\\_LAS\\_ARCILLAS\\_ALOFANAS\\_Y\\_SU\\_RELACION\\_CON\\_LAS\\_PROPIEDADES\\_FISICAS\\_Y\\_QUIMICAS\\_DEL\\_SUELO](https://www.researchgate.net/publication/341726619_LAS_ARCILLAS_ALOFANAS_Y_SU_RELACION_CON_LAS_PROPIEDADES_FISICAS_Y_QUIMICAS_DEL_SUELO)
- Rampello, S., & Amorosi, A. (1998). The influence of natural soil structure on the mechanical behaviour of a stiff clay. In *Geotechnique*.  
<https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.2.153>
- Redolfi, E. (2007). Suelos Colapsables. *Universidad Nacional De Cordoba - Argentina*, 36.  
[http://www.docentes.unal.edu.co/aepazgon/docs/Suelos Colapsables.pdf](http://www.docentes.unal.edu.co/aepazgon/docs/Suelos%20Colapsables.pdf)
- Reginatto, A. (1970). Predicción de la Susceptibilidad al Colapso. *2º Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*.
- Richards, B. G., Peter, P., & Emerson, W. W. (1983). The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia. *Géotechnique*, 33(2), 127–139.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1983.33.2.127>
- Ridley, A. M., & Burland, J. (1996). A pore pressure probe for the in situ measurement of a wide range of soil suction. *Advances in site investigation practice. Thomas Telford London*, 510–520.
- Rodríguez-Iturbe, I., Laio, F., Porporato, A., & Ridolfi, L. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: II. Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources*, 24(7), 707–723.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00005-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00005-7)
- Rodríguez, E. A. (2014). *Evaluación del Comportamiento Geomecánico de Arcillas en el Sector de Campoalegre – Ciudad de Barranquilla*. Universidad Nacional de COlombia.
- Romero Morales, E. E. (1999). *Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study*. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Roscoe, K. H., & Burland, J. B. (1968). *On the generalized stress-strain behaviour of wet clay*.
- Roscoe, K. H., Schofield, A. N., & Wroth, C. P. (1958). On The Yielding of Soils. *Géotechnique*, 8(1), 22–53. <https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.1.22>
- Ruiz, A. (2006). *Origen, formación, estructura y comportamiento de la arcilla de Bogotá*.
- Saito, T., & Miki, G. (1975). Swelling And Residual Strength Characteristics of Soils Based On A Newly Proposed “Plastic Ratio Chart.” *Soils and Foundations*, 15(1), 61–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.3208/sandf1972.15.61>
- Salas, J. A., & Serratos, J. M. (1953). Compressibility of Clays. In *3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Switzerland)*.
- Schofield, A. N., & Wroth, P. (1968). *Critical state soil mechanics* (Vol. 310). McGraw-hill London.
- Skempton, A. W. (1953). The colloidal “activity” of clays. *3rd Int. Conf Soil Mech.* 1, 57–61.
- Skempton, A. W., & Bjerrum, L. (1957). A Contribution to the settlement analysis of foundations on clay. *Géotechnique*, 7(4), 168–178. <https://doi.org/10.1680/geot.1957.7.4.168>
- Skempton, A. W., Schuster, R. L., & Petley, D. J. (1969). Joints and Fissures in the London Clay at Wraysbury and Edgware. *Géotechnique*, 19(2), 205–217. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.205>
- Sridharan, A., Rao, A. S., & Sivapullaiah, P. V. (1986). *Swelling Pressure of Clays*. ASTM International. <https://books.google.com.co/books?id=9xp3zgEACAAJ>
- Suter, F. (2003). *Geologie de la region de Playa Azul, partie occidentale distale du fan fluvio-volcanique du Quindío (Serranía de Santa Barbara, Quindío et Valle del Cauca, Colombie)*. Université de Genève.
- Terjung, W. H. (1966). PHYSIOLOGIC CLIMATES OF THE CONTERMINOUS UNITED STATES: A BIOCLIMATIC CLASSIFICATION BASED ON MAN. *Annals of the Association of American Geographers*, 56(1), 141–179. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1966.tb00549.x>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). Soil Mechanics. *Engineering Practice*. John Wiley and

- Sons, Inc., New York.*
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Thornbury, W. (1960). *Principios de Geomorfología*.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). The Water Balance. *Climatology*.
- Torres, S., M. C., & Alarcón G., A. (2007). *Some aspects of degradability of argillaceous rocks*. Taylor & Francis Group.
- Torres, M. C. (2011). *Efectos de los ciclos de carga-descarga y humedecimiento-secado en el comportamiento geomecánico de rocas lodosas de los Andes colombianos*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Toussaint, J. F. (1993). *Evolución geológica de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. <https://books.google.com.co/books?id=KyleAQAAAMAAJ>
- Trejo, A., & Martínez, A. (1991). Agrietamiento en suelos zona de Querétaro. *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, 67.73.
- Tristancho, J., & Caicedo, B. (2008). Modelación física en centrífuga de la interacción suelo – atmósfera. *Memorias XII Congreso Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia*.
- Uscátegui, A. L.-G. (1992). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. VII *Jornadas Geotécnicas de La Ingeniería (Colombia)*, 1–12.
- USGS. (2001). *Open-File Report 01-041: A laboratory manual for X-ray powder diffraction*. [pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/html/docs/xrpd.htm](https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/html/docs/xrpd.htm)
- van der Hammen, T. (1998). *Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá: análisis y orientaciones para el ordenamiento territorial*.
- Van der Hammen, T., & Karin, H. (2003). *Neogeno y cuaternario del Altiplano de Bogotá y alrededores*. IGAC.
- Van der Marel, H. W., & Beutelspacher, H. (1976). *Atlas of infrared spectroscopy of clay minerals and their admixtures*. Elsevier Publishing Company.
- van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial Photo-interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*. Smits Publishers.



<https://books.google.com.co/books?id=zGLGQgAACAAJ>

Verrujit, A. (2001). *No Title*.

Verstappen, H. T., & Zuidam, R. A. (1992). The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)*, 2.

Villota, H. (1997). Geomorfología Aplicada a Levantamientos Edafológicos y Zonificación Física de Tierras. *Revista CIAF*, 15, 73.

Yong, R. N., & Sheeran, D. E. (1973). Fabric unit interaction and soil behaviour. *Proceedings International Symposium on Soil Structure*.

Zur, A., & Wiseman, G. (1973). A Study of Collapse Phenomena of an Undisturbed Loess. *The 8<sup>o</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 265–268.

**ANEXO 5.1**

**LOCALIZACIÓN PUNTOS DE MUESTREO**

**INFORMACIÓN SECUNDARIA PARA LAS TRES**

**ZONAS PILOTO**

Tabla 5.1.1

Información puntos de muestreo geotécnico a partir de información secundaria para el municipio de Tabio en Sabana de Bogotá – Zona piloto 1 (adaptado SGC, 2010)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	TIPO DE INFORMACIÓN	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	No TOTAL MUESTRAS
CUN-TA-NA-AP1-M1	NATIVA	TABIO	4,9630	74,0743	APIQUE	-	1	6
CUN-TA-NA-AP2-M1	NATIVA	TABIO	4,9509	74,0883	APIQUE	A	2	2
CUN-TA-NA-AP3-M1	NATIVA	TABIO	4,9351	74,10454	APIQUE	A	3	4
CUN-TA-NA-AP4-M1	NATIVA	TABIO	4,9382	74,07704	APIQUE	A	4	3
CUN-TA-NA-S1-M1	NATIVA	TABIO	4,9811	74,06749	SONDEO	A	1	4
CUN-TA-NA-S2-M1	NATIVA	TABIO	4,9658	74,08404	SONDEO	A	2	2
CUN-TA-NA-S3-M1	NATIVA	TABIO	4,9350	74,1045	SONDEO	I	3	10
CUN-TA-NA-S4-M1	NATIVA	TABIO	4,9292	74,10584	SONDEO	A	4	7
CUN-TA-NA-S5-M1	NATIVA	TABIO	4,9336	74,08415	SONDEO	A	5	5
CUN-TA-NA-S6-M1	NATIVA	TABIO	4,9919	74,07094	SONDEO	A	6	7
CUN-TA-SC002-AP1-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.363	1.000.300	APIQUE	A	1	4
CUN-TA-SC002-AP2-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.180	1.000.210	APIQUE	A	2	3
CUN-TA-SC002-AP3-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.030.155	1.000.305	APIQUE	A	3	3
CUN-TA-SC002-AP4-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.175	1.000.365	APIQUE	A	4	3
CUN-TA-SC002-S1-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.325	1.000.275	SONDEO	A	1	4
CUN-TA-SC002-S2-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.285	1.000.250	SONDEO	A	2	4
CUN-TA-SC002-S3-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.275	1.000.225	SONDEO	A	3	4
CUN-TA-SC002-S4-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.225	1.000.200	SONDEO	A	4	4
CUN-TA-SC002-S5-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.175	1.000.220	SONDEO	A	5	2
CUN-TA-SC002-S6-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.165	1.000.245	SONDEO	A	6	2
CUN-TA-SC002-S9-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.160	1.000.355	SONDEO	A	9	3
CUN-TA-SC002-S10-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.170	1.000.360	SONDEO	A	10	3
CUN-TA-SC002-S11-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.180	1.000.370	SONDEO	A	11	4
CUN-TA-SC002-S12-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.036.185	1.000.390	SONDEO	A	12	4
CUN-TA-SC029-AP1-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.034.379	997.620	APIQUE	I	1	4
CUN-TA-SC029-AP2-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.034.261	997.637	APIQUE	I	2	2
CUN-TA-SC029-AP3-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.034.205	997.610	APIQUE	I	3	4
CUN-TA-SC029-PE1-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.034.350	997.600	PERFORACION	A	1	11
CUN-TA-SC029-PE2-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.034.306	997.614	PERFORACION	A	2	15
CUN-TA-SC029-PE3-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.034.202	997.652	PERFORACION	A	3	12
CUN-TA-SC029-PE4-M1	SECUNDARIA	TABIO	1.034.156	997.682	PERFORACION	A	4	11
<b>SUBTOTAL TABIO</b>			<b>30 CON COORDENADA</b>				<b>30</b>	<b>156</b>
CUN-TE-NA-AP1-M1	NATIVA	TENJO	4,8732	74,11817	APIQUE	A	1	3
CUN-TE-NA-AP2-M1	NATIVA	TENJO	4,9013	74,11699	APIQUE	A	2	3
CUN-TE-NA-AP3-M1	NATIVA	TENJO	4,8582	74,1787	APIQUE	A	3	5
CUN-TE-NA-AP4-M1	NATIVA	TENJO	4,8605	74,14351	APIQUE	A	4	5
CUN-TE-NA-S1-M1	NATIVA	TENJO	4,8732	74,11815	SONDEO	A	1	8
CUN-TE-NA-S2-M1	NATIVA	TENJO	4,7978	74,18758	SONDEO	A	2	9
CUN-TE-NA-S3-M1	NATIVA	TENJO	4,8528	74,11416	SONDEO	I	3	10
CUN-TE-NA-S4-M1	NATIVA	TENJO	4,8271	74,18688	SONDEO	A	4	6
CUN-TE-NA-S5-M1	NATIVA	TENJO	4,7978	74,1574	SONDEO	A	5	9
CUN-TE-NA-S6-M1	NATIVA	TENJO	4,8418	74,12826	SONDEO	A	6	12
CUN-TE-NA-S7-M1	NATIVA	TENJO	-	-	SONDEO	A	7	7
CUN-TE-SC002-AP1-M1	SECUNDARIA	TENJO	1.030.275	992.575	APIQUE	A	1	6
CUN-TE-SC002-AP2-M1	SECUNDARIA	TENJO	1.030.303	992.597	APIQUE	A	2	8
CUN-TE-SC002-AP3-M1	SECUNDARIA	TENJO	1.030.309	992.590	APIQUE	A	3	8
CUN-TE-SC002-AP4-M1	SECUNDARIA	TENJO	1.030.292	992.575	APIQUE	A	4	4
CUN-TE-SC002-S1-M1	SECUNDARIA	TENJO	1.030.326	992.614	SONDEO	A	1	7
<b>SUBTOTAL TENJO</b>			<b>15 CON COORDENADA</b>				<b>16</b>	<b>110</b>
<b>TOTAL</b>							<b>46</b>	<b>266</b>

Tabla 5.1.2

Información puntos de muestreo geotécnico a partir de información secundaria para los municipios identificados en Quindio-zona piloto 2 -parte 1 (adaptado SGC, 2010)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	TIPO DE INFORMACION	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	No. TOTAL MUESTRAS
QUI-AR-NA-AP1-M1	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	992.891	814.894	APIQUE	-	1	8
QUI-AR-NA-AP2-M1	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	993.514	815.099	APIQUE	-	2	3
QUI-AR-NA-AP3-M1	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	979.934	811.076	APIQUE	-	3	9
QUI-AR-NA-AP4-M1	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	988.253	811.131	APIQUE	-	4	6
QUI-AR-NA-AP8-M8	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	987.789	818.126	APIQUE	-	8	1
QUI-AR-NA-AP9-M6	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	988.641	819.120	APIQUE	-	9	3
QUI-AR-NA-AP16-M7	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	985.319	814.639	APIQUE	-	16	3
QUI-AR-NA-AP20-M5	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	985.876	818.779	APIQUE	-	20	1
QUI-AR-NA-AP26-M5	NATIVA	QUINDIO	ARMENIA	992.642	818.779	APIQUE	-	26	1
QUI-AR-SC99-P1-M1A	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	C. DORADA-B.C	DORADA-B.C	PERFORACION	I	1	23
QUI-AR-SC99-P2-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	D BARRIO LIMO	BARRIO LIMO	PERFORACION	I	2	23
QUI-AR-SC99-P3-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	GALERIA	GALERIA	PERFORACION	I	3	23
QUI-AR-SC99-P4-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	ARMENIA - BARRIO	CENIA - BARRIO	PERFORACION	I	4	20
QUI-AR-SC99-P5-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	PARQUE URIBE	PARQUE URIBE	PERFORACION	I	5	29
QUI-AR-SC99-T1-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	BARRIO BRASIL	BARRIO BRASIL	TRINCHERA	A	1	3
QUI-AR-SC99-T2-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	RASILIA COSTA	SILIA COSTA	TRINCHERA	A	2	1
QUI-AR-SC99-T4-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	BARRIO MODELO	BARRIO MODELO	TRINCHERA	A	4	2
QUI-AR-SC99-T5-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	CALIDA A CALAR	CIDA A CALAR	TRINCHERA	A	5	2
QUI-AR-SC99-T8-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	CAR QUINDIO	CAR QUINDIO	TRINCHERA	A	8	2
QUI-AR-SC99-T9-M1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	BORIGEN Q. LA	RIGEN Q. LA	TRINCHERA	A	9	1
QUI-AR-SCRG-04-A2-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°32'18.5"	75°44'48.5"	RRENO MANU	-	A2	11
QUI-AR-SCRG-04-A3-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°24'56.3"	75°46'57.9"	RRENO MANU	-	A3	11
QUI-AR-SCRG-04-A4-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°29,450"	75°46'946"	RRENO MANU	-	A4	6
QUI-AR-SCRG-04-A5-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°29'40"	75°43'24.0"	RRENO MANU	-	A5	7
QUI-AR-SCRG-04-A6-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°30'52.4"	75°45'52.7"	RRENO MANU	A	A6	6
QUI-AR-SCRG-04-A7-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°29'44.6"	75°42'18.4"	RRENO MANU	-	A7	5
QUI-AR-SCRG-04-A8-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°29,207"	75°43.165'	RRENO MANU	-	A8	9
QUI-AR-SCRG-04-A9-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°29.67"	75°42.629'	RRENO MANU	A	A9	10
QUI-AR-SCRG-04-A10-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°30' 29.6"	75°45'5.8"	RRENO MANU	-	A10	11
QUI-AR-SCRG-04-A11-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°30'55.7"	75°44'38.9"	RRENO MANU	-	A11	15
QUI-AR-SCRG-04-A16-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°27'51.8"	75°45'2.8"	RRENO MANU	A	A16	10
QUI-AR-SCRG-04-A17-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°28'32.6"	75°44'36.8"	RRENO MANU	A	A17	5
QUI-AR-SCRG-04-A18-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°27'37.7"	75°44'41.4"	RRENO MANU	-	A18	8
QUI-AR-SCRG-04-A19-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°26'52"	75°44'55.5"	RRENO MANU	-	A19	7
QUI-AR-SCRG-04-A20-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°28'10.2"	75°42'48.6"	RRENO MANU	-	A20	7
QUI-AR-SCRG-04-A21-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°27'15.1"	75°43'55.4"	RRENO MANU	A	A21	5
QUI-AR-SCRG-04-A22-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°25'16.6"	75°45'41"	RRENO MANU	-	A22	6
QUI-AR-SCRG-04-A23-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°26'18.7"	75°44'36.7"	RRENO MANU	A	A23	6
QUI-AR-SCRG-04-A24-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°27'11.1"	75°45'53.6"	RRENO MANU	-	A24	8
QUI-AR-SCRG-04-A25-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°25'48.3"	75°45'10.2"	RRENO MANU	A	A25	9
QUI-AR-SCRG-04-A26-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°31'50.3"	75°43'35.7"	RRENO MANU	-	A26	8
QUI-AR-SCRG-04-A27-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°24'39.5"	75°46'44.8"	RRENO MANU	A	A27	7
QUI-AR-SCRG-04-A1-1-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°25'41.9"	75°46'46.5"	RRENO MANU	A	A1-1	8
QUI-AR-SCRG-04-A1-2-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°29'22.7"	75°45'52.2"	RRENO MANU	-	A2-1	7
QUI-AR-SCRG-04-A1-3-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°28'33.4"	75°47'52.6"	RRENO MANU	A	A3-1	9
QUI-AR-SCRG-04-A1-4-1	SECUNDARIA	QUINDIO	ARMENIA	4°28'57.6"	75°47'29.5"	RRENO MANU	-	A4-1	8
<b>SUBTOTAL ARMENIA</b>				<b>45 CON COORDENADA</b>				<b>120</b>	<b>382</b>

Tabla 5.1.3

Información puntos de muestreo geotécnico a partir de información secundaria para - municipios de Montenegro y Tebaida- Quindío – zona piloto 2 -parte 2 (adaptado SGC, 2010)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	TIPO DE INFORMACIÓN	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	No TOTAL MUESTRAS
QUI-MON-NA-MS1-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	986.526	804.506	SONDEO	-	1	11
QUI-MON-NA-MS2-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	986.727	801.398	SONDEO	-	2	9
QUI-MON-NA-MS3-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	987.261	804.468	SONDEO	-	3	8
QUI-MON-NA-MS4-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	987.245	805.952	SONDEO	-	4	9
QUI-MON-NA-MS5-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	-	-	SONDEO	-	5	9
QUI-MON-NA-MS6-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	988.085	804.100	SONDEO	-	6	8
QUI-MON-NA-MS7-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	989.766	808.249	SONDEO	-	7	7
QUI-MON-NA-MS8-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	987.460	803.355	SONDEO	-	8	8
QUI-MON-NA-MS9-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	989.665	807.490	SONDEO	-	9	4
QUI-MON-NA-MS10-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	990.031	806.597	SONDEO	-	10	9
QUI-MON-NA-MS11-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	990.031	806.597	SONDEO	-	11	6
QUI-MON-NA-MS12-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	996.741	807.066	SONDEO	-	12	8
QUI-MON-NA-MS13-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	996.629	805.443	SONDEO	-	13	10
QUI-MON-NA-MS14-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	988.867	802.365	SONDEO	-	14	5
QUI-MON-NA-MS15-M1	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	988.867	802.365	SONDEO	-	15	5
QUI-MON-NA-MM2-M2	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	986.727	801.398	SONDEO	-	M2	1
QUI-MON-NA-MM3-MTS1(A)	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	987.261	804.468	SONDEO	-	M3	2
QUI-MON-NA-MM5-M3	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	993.557	804.829	SONDEO	-	M6	4
QUI-MON-NA-MM7-M3	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	989.766	808.249	SONDEO	-	M7	5
QUI-MON-NA-MM11-M11	NATIVA	QUINDIO	MONTENEGRO	990.170	807.513	SONDEO	-	M11	1
QUI-AR-SCRG-04-MM1-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°28'30.3"	75°50'31.4"	RRENO MANU	A	MM1	7
QUI-AR-SCRG-04-MM2-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°28'36.6"	75°52'12.2"	RRENO MANU	-	MM2	6
QUI-AR-SCRG-04-MM3-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°28'54.2"	75°50'32.7"	RRENO MANU	A	MM3	6
QUI-AR-SCRG-04-MM4-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°28'53.8"	75°49'44.6"	RRENO MANU	-	MM4	6
QUI-AR-SCRG-04-MM5-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°32'19.1"	75°50'21.5"	RRENO MANU	-	MM5	7
QUI-AR-SCRG-04-MM6-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°29'21"	75°50'44.7"	RRENO MANU	-	MM6	12
QUI-AR-SCRG-04-MM7-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°30'16"	75°48'30.3"	RRENO MANU	-	MM7	13
QUI-AR-SCRG-04-MM8-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°29'0.6"	75°51'8.8"	RRENO MANU	-	MM8	8
QUI-AR-SCRG-04-MM9-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°30'12.7"	75°48'54.9"	RRENO MANU	-	MM9	11
QUI-AR-SCRG-04-MM10-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°30'24.5"	75°49'23.9"	RRENO MANU	A	MM10	10
QUI-AR-SCRG-04-MM11-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°30'29.2"	75°48'54.2"	RRENO MANU	-	MM11	14
QUI-AR-SCRG-04-MS1-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°32'46.3"	75°44'54.3"	RRENO MANU	-	MS1	12
QUI-AR-SCRG-04-MS2-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°34'45.4"	75°44'27"	RRENO MANU	A	MS2	12
QUI-AR-SCRG-04-MS3-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°32'34.2"	75°47'17.7"	RRENO MANU	A	MS3	8
QUI-AR-SCRG-04-MS4-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°30'57.8"	75°47'15.3"	RRENO MANU	-	MS4	10
QUI-AR-SCRG-04-MS5-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°31'6.3"	75°49'3.2"	RRENO MANU	-	MS5	11
QUI-AR-SCRG-04-MS7-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°32'37.3"	75°51'39.7"	RRENO MANU	A	MS7	10
QUI-AR-SCRG-04-MS8-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	-	75°50'17.5"	RRENO MANU	-	MS8	11
QUI-AR-SCRG-04-MS9-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°28'24.5"	75°51'25.3"	RRENO MANU	-	MS9	5
QUI-AR-SCRG-04-MS10-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°29'10.8"	75°49'2.7"	RRENO MANU	A	MS10	10
QUI-AR-SCRG-04-MS11-8	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°30'22.7"	75°50'18.4"	RRENO MANU	A	M11	8
QUI-AR-SCRG-04-MS12-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°34'2.9"	75°49'9.2"	RRENO MANU	A	MS12	8
QUI-AR-SCRG-04-M13-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°32'21.5"	75°50'1.6"	RRENO MANU	-	M13	11
QUI-AR-SCRG-04-M14-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°29'46.7"	75°51'4.1"	RRENO MANU	-	M14	6
QUI-AR-SCRG-04-MS15-1	SECUNDARIA	QUINDIO	MONTENEGRO	4°33'25.9"	75°43'21.1"	RRENO MANU	-	MS15	7
<b>SUBTOTAL MONTENEGRO</b>				<b>42 CON COORDENADA</b>				<b>44</b>	<b>358</b>

Tabla 5.1.4

Información puntos de muestreo geotécnico a partir de información secundaria para - municipios de Montenegro y Tebaida- Quindío - zona piloto 2 -parte 3 (adaptado SGC, 2010)

QUI-TE-NA-T1-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	980.986	805.462	SONDEO	-	1	6
QUI-TE-NA-T2-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	982.526	801.619	SONDEO	-	2	10
QUI-TE-NA-T3-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	980.015	800.385	SONDEO	-	3	6
QUI-TE-NA-T4-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	980.867	809.292	SONDEO	-	4	5
QUI-TE-NA-T5-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	984.022	806.925	SONDEO	-	5	4
QUI-TE-NA-T5A-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	983.803	805.801	SONDEO	-	5A	17
QUI-TE-NA-T6-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	984.897	812.503	SONDEO	-	6	3
QUI-TE-NA-T7-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	984.897	812.503	SONDEO	-	7	11
QUI-TE-NA-T8-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	982.456	811.820	SONDEO	-	8	3
QUI-TE-NA-T9-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	981.365	811.659	SONDEO	-	9	4
QUI-TE-NA-T15-M1	NATIVA	QUINDIO	LA TEBaida	985.269	808.445	SONDEO	-	15	5
QUI-AR-SCRG-04-T1-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°25'30.1"	75°50'00"	RRENO MANU	-	T1	7
QUI-AR-SCRG-04-T2-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°26'19.9"	75°52'04.7"	RRENO MANU	A	T2	16
QUI-AR-SCRG-04-T3-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°24'58.1"	75°52'44.5"	RRENO MANU	-	T3	7
QUI-AR-SCRG-04-T4-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°25'26.5"	75°47'55.8"	RRENO MANU	-	T4	10
QUI-AR-SCRG-04-T5-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°27'09"	75°49'12.8"	RRENO MANU	A	T5	5
QUI-AR-SCRG-04-T5A-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°27'01.8"	75°48'49.2"	RRENO MANU	A	T5A	17
QUI-AR-SCRG-04-T6-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°27'37.9"	75°46'12"	RRENO MANU	-	T6	6
QUI-AR-SCRG-04-T7-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°26'07.2"	75°48'35.2"	RRENO MANU	A	T7	11
QUI-AR-SCRG-04-T8-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°25'26.6"	75°46'55.8"	RRENO MANU	-	T8	6
QUI-AR-SCRG-04-T9-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°25'42.9"	75°46'39.1"	RRENO MANU	-	T9	5
QUI-AR-SCRG-04-T15-1	SECUNDARIA	QUINDIO	LA TEBaida	4°27'49.7"	75°48'23.6"	RRENO MANU	-	T15	7
<b>SUBTOTAL LA TEBaida</b>				<b>21 CON COORDENADA</b>				<b>21</b>	<b>171</b>
<b>TOTAL</b>								<b>185</b>	<b>911</b>

Tabla 5.1.5

Información puntos de muestreo geotécnico a partir de información secundaria para los municipios identificados en municipio de Barranquilla sector Loma Roja- zona piloto 3 (adaptado SGC, 2011)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	No TOTAL MUESTRAS	
ATL-BRR-NA-P55-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	-	-	SONDEO	A	P55	11	
ATL-BRR-NA-P56-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	-	-	SONDEO	A	P56	10	
ATL-BRR-NA-P57-M8	ATLANTICO	BARRANQUILLA	-	-	SONDEO	A	P57	13	
ATL-BRR-NA-P58-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	-	-	SONDEO	A	58	10	
ATL-BRR-NA-P59-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	-	-	SONDEO	A	59	9	
ATL-BRR-NA-P60-M2	ATLANTICO	BARRANQUILLA	-	-	SONDEO	A	60	13	
ATL-BRR-NA-P61-M2	ATLANTICO	BARRANQUILLA	-	-	SONDEO	A	61	14	
ATL-BRR-NA-P45-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	alle 63 B - Carrera	163 B - Carre	SONDEO	A	45	13	
ATL-BRR-NA-P48-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	7 (Calle Jesus) - Ca	jalle Jesus) -	SONDEO	A	48	12	
ATL-BRR-NA-P49-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	(Calle Jesus) - Ca	jalle Jesus) -	SONDEO	A	49	13	
ATL-BRR-NA-P50-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	Carrera 11 - Calle	64 Carrera 11 - Call	SONDEO	A	50	13	
ATL-BRR-NA-P51-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	rera 15 E, Entrada	pa 15 E, Entrad	SONDEO	A	51	13	
ATL-BRR-NA-P52-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	rera 15 E, Entrada	pa 15 E, Entrad	SONDEO	A	52	13	
ATL-BRR-NA-P53-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	rera 15 E, Entrada	pa 15 E, Entrad	SONDEO	A	53	11	
ATL-BRR-NA-P54-M1	ATLANTICO	BARRANQUILLA	alle 83 - carrera	41 83 - carrera	SONDEO	A	54	13	
<b>TOTAL</b>								<b>17</b>	<b>207</b>

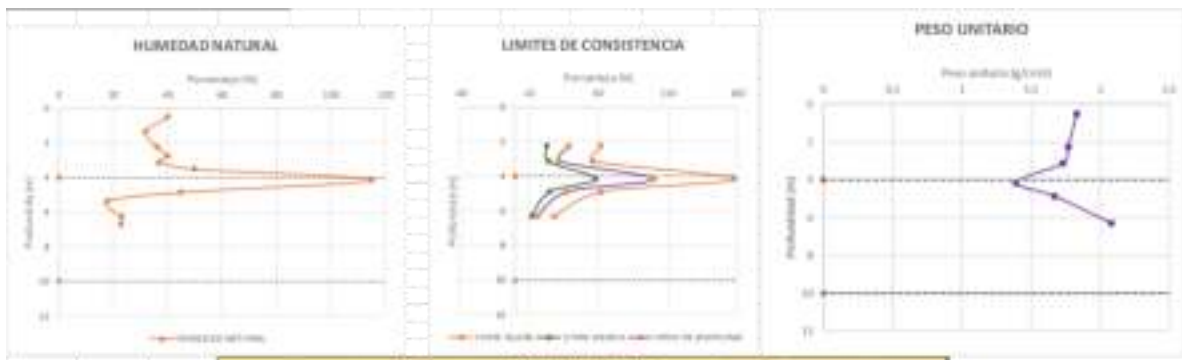
## **ANEXO 5.2**

# **DATOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO DE INFORMACIÓN SECUNDARIA TRES ZONAS PILOTO ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR SONDEO**

**ANEXO 5.2.1**  
**ZONA PILOTO 1**



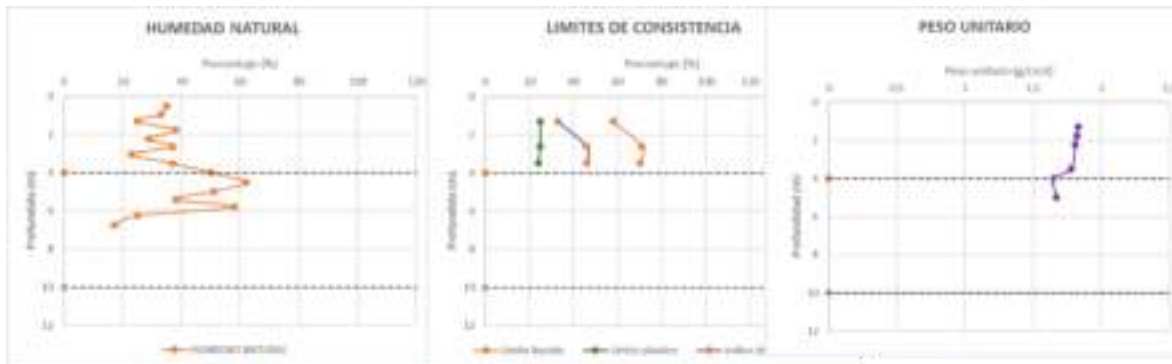
CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION								PROPIEDADES INDICIALES							COMPRESION INCONFINADA					
	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm3)	PESO UNITARIO SECO (g/cm3)	qu INCONFINADA (kg/cm2)	DEFORMACION UNITARIA
CUN-TA-SC029-PE1-M1	TABIO	1034350	997600	A	1	1	0,27	0,75	0,51	40				1,8							
CUN-TA-SC029-PE1-M2	TABIO	1034350	997600	A	1	2	0,75	2	1,375	32						CH					
CUN-TA-SC029-PE1-M3	TABIO	1034350	997600	I	1	3	2	2,5	2,25	36,28	62	23	39	1,8		CH	36,28	1,77	1,30	1,5	13,9
CUN-TA-SC029-PE1-M4	TABIO	1034350	997600	A	1	4	2,5	3	2,75	40						CH					
CUN-TA-SC029-PE1-M5	TABIO	1034350	997600	A	1	5	3	3,27	3,135	37	56	24	32	1,7		CH					
CUN-TA-SC029-PE1-M6	TABIO	1034350	997600	A	1	6	3,27	3,8	3,535	50						CH					
CUN-TA-SC029-PE1-M7	TABIO	1034350	997600	I	1	7	3,8	4,5	4,15	115,27	158	58	100	1,4		CH	115,27	1,39	0,65	1	4
CUN-TA-SC029-PE1-M8	TABIO	1034350	997600	I	1	8	4,5	5,25	4,875	45	62	25	37	1,7	35,8	CH					
CUN-TA-SC029-PE1-M9	TABIO	1034350	997600	A	1	9	5,25	5,5	5,375	18				35,8							
CUN-TA-SC029-PE1-M10	TABIO	1034350	997600	I	1	10	6	6,6	6,3	23,37	28	12	16	2,1	32,8		23,37	2,08	1,69	0,43	8,8
CUN-TA-SC029-PE1-M11	TABIO	1034350	997600	A	1	11	6,6	6,85	6,725	23				32,8							



Clase Litológica	Profundidad (m)	Clasificación estadística	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	CLASIFICACION USCS
A	0,00 - 3,50	Media μ	37,06	59,00	23,50	35,50	1,78	CH
		Desviación	3,30	4,24	0,71	4,95	0,05	
		COV	0,09	0,07	0,03	0,14	0,03	
B	3,50 - 8,50	Media μ	45,77	82,67	31,67	58,00	1,71	CH
		Desviación	36,44	67,42	23,73	43,71	0,35	
		COV	0,80	0,82	0,75	0,86	0,20	

Figura 5.2.1 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tabio Sabana de Bogotá-PE-1. (fuente propia)

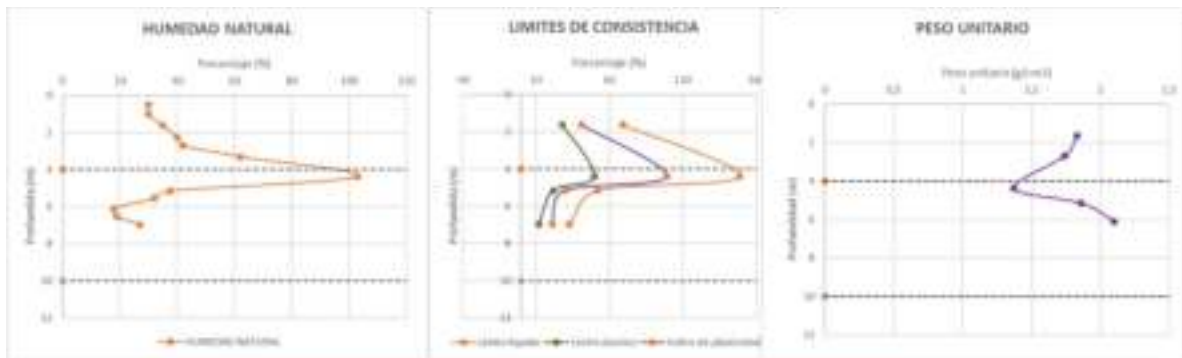
CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE					RIA MROME	
	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)		TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA
CUN-TA-SC029-PE2-M1	1034306	997614	2	1	0,25	0,75	0,5	35						
CUN-TA-SC029-PE2-M2	1034306	997614	2	2	0,75	1,1	0,925	33						
CUN-TA-SC029-PE2-M3	1034306	997614	2	3	1,1	1,5	1,3	25	58	25	33	1,83		CH
CUN-TA-SC029-PE2-M4	1034306	997614	2	4	1,5	2	1,75	38				1,82		CH
CUN-TA-SC029-PE2-M5	1034306	997614	2	5	2	2,45	2,225	29				1,81		CH
CUN-TA-SC029-PE2-M6	1034306	997614	2	6	2,45	2,8	2,625	37	71	25	46			CH
CUN-TA-SC029-PE2-M7	1034306	997614	2	7	2,8	3,25	3,025	23						CH
CUN-TA-SC029-PE2-M8	1034306	997614	2	8	3,25	3,75	3,5	37	70	24	46	1,78		CH
CUN-TA-SC029-PE2-M9	1034306	997614	2	9	3,75	4,25	4	50				1,65		CH
CUN-TA-SC029-PE2-M10	1034306	997614	2	10	4,25	4,75	4,5	62						CH
CUN-TA-SC029-PE2-M11	1034306	997614	2	11	4,75	5,2	4,975	51				1,67		CH
CUN-TA-SC029-PE2-M12	1034306	997614	2	12	5,2	5,6	5,4	38						CH
CUN-TA-SC029-PE2-M13	1034306	997614	2	13	5,6	6	5,8	58						CH
CUN-TA-SC029-PE2-M14	1034306	997614	2	14	6	6,5	6,25	25						CH
CUN-TA-SC029-PE2-M15	1034306	997614	2	15	6,5	7	6,75	17					47,6	



Intervalo	Profundidad (m)	PROPIEDADES INDICE					PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	CLASIFICACION INDICE
		Media $\mu$	Desviación estándar	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)		
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	32,33	96,33	24,67	41,67	1,81	CH
		Desviación	3,88	9,39	0,00	9,39		
		COV	0,18	0,14	0,00	0,22		
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	43,00	N.A.	N.A.	N.A.	1,66	CH
		Desviación	16,35	N.A.	N.A.	N.A.		
		COV	0,39	N.A.	N.A.	N.A.		

Figura 5.2.2 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tabio Sabana de Bogotá-PE-2. (fuente propia)

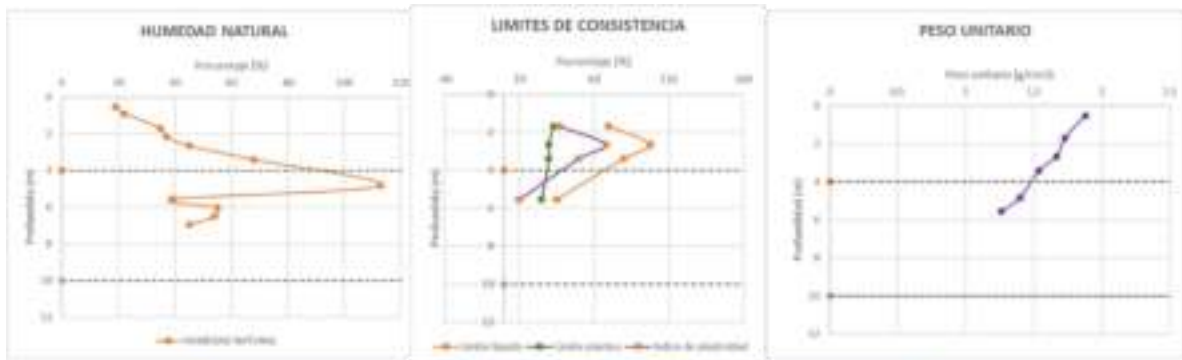
CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE							RIA M	ROME	COMPRESION INCONFINADA				
	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (gr/cm3)	PESO UNITARIO SECO (gr/cm3)	qu INCONFINADA (kg/cm2)	DEFORMACION UNITARIA	
CUN-TA-SC029-PE3-M1	TABIO	1034202	997652	3	1	0,25	0,75	0,5	30												
CUN-TA-SC029-PE3-M2	TABIO	1034202	997652	3	2	0,75	1,25	1	30												
CUN-TA-SC029-PE3-M3	TABIO	1034202	997652	3	3	1,45	1,8	1,625	35	69	28	41	1,83		CH						
CUN-TA-SC029-PE3-M4	TABIO	1034202	997652	3	4	2	2,5	2,25	40						CH						
CUN-TA-SC029-PE3-M5	TABIO	1034202	997652	3	5	2,5	2,9	2,7	42				1,74		CH						
CUN-TA-SC029-PE3-M6	TABIO	1034202	997652	3	6	3,1	3,5	3,3	62						CH						
CUN-TA-SC029-PE3-M7	TABIO	1034202	997652	3	7	4	4,75	4,375	103	149	50	99	1,37		CH						
CUN-TA-SC029-PE3-M8	TABIO	1034202	997652	3	8	4,9	5,4	5,15	37,36	52	22	30	1,86		CH	37,36	1,86	1,35	0,64	9	
CUN-TA-SC029-PE3-M9	TABIO	1034202	997652	3	9	5,3	5,8	5,55	32						CH						
CUN-TA-SC029-PE3-M10	TABIO	1034202	997652	3	10	5,9	6,3	6,1	18				2,1	24,7	CH						
CUN-TA-SC029-PE3-M11	TABIO	1034202	997652	3	11	6,3	6,75	6,525	19					24,7							
CUN-TA-SC029-PE3-M12	TABIO	1034202	997652	3	12	6,75	7,2	6,975	27	33	12	21		24,7	CL						



PROPIEDADES INDICE								
Perfil Litológico	Profundidad (m)	Descripción estadística	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	CLASIFICACION USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	38,83	69,00	28,00	41,00	1,79	CH
		Desviación	11,94	N.A.	N.A.	N.A.	0,06	
		COV	0,30	N.A.	N.A.	N.A.	0,04	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	38,39	78,00	28,00	50,00	1,78	CH
		Desviación	32,04	62,22	23,70	42,67	0,37	
		COV	0,81	0,80	0,70	0,85	0,21	

Figura 5.2.3 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tabio Sabana de Bogotá-PE-3. (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE					ROME	COMPRESION INCONFINADA					
	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO		PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	CLASIFICACION USCS	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm3)	PESO UNITARIO SECO (g/cm3)	qu INCONFINADA (kg/cm2)
CUN-TA-SC029-PE4-M1	TABIO	1034156	997682	4	1	0,27	0,75	0,51	19				1,88						
CUN-TA-SC029-PE4-M2	TABIO	1034156	997682	4	2	0,75	1,04	0,895	22										
CUN-TA-SC029-PE4-M3	TABIO	1034156	997682	4	3	1,5	1,9	1,7	35	70	33	37	1,73	CH					
CUN-TA-SC029-PE4-M4	TABIO	1034156	997682	4	4	1,9	2,4	2,15	37					CH					
CUN-TA-SC029-PE4-M5	TABIO	1034156	997682	4	5	2,5	2,8	2,65	45	98	30	68	1,67	CH					
CUN-TA-SC029-PE4-M6	TABIO	1034156	997682	4	6	3	3,8	3,4	68	80	30	50	1,54	CH					
CUN-TA-SC029-PE4-M7	TABIO	1034156	997682	4	7	4,6	5,05	4,825	112,79				1,4	CH	112,79	1,40	6,58	1,18	7,2
CUN-TA-SC029-PE4-M8	TABIO	1034156	997682	4	8	5,3	5,8	5,55	39,22	35	25	10	1,26	CH	39,22	1,26	0,91	0,54	8,5
CUN-TA-SC029-PE4-M9	TABIO	1034156	997682	4	9	5,8	6,25	6,025	55					CH					
CUN-TA-SC029-PE4-M10	TABIO	1034156	997682	4	10	6,25	6,75	6,5	54					CH					
CUN-TA-SC029-PE4-M11	TABIO	1034156	997682	4	11	6,75	7,15	6,95	45					CH					



Medio (Litología)	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	PROPIEDADES INDICE					PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	CLASIFICACION USCS
			w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO			
A	0,00 - 3,50	Media μ	37,67	82,67	31,00	51,67	1,71	CH	
		Desviación	17,75	14,19	1,75	15,57	0,14		
		COV	0,47	0,17	0,06	0,30	0,08		
B	3,50 - 8,50	Media μ	61,20	35,00	25,00	30,00	1,33	CH	
		Desviación	29,57	N.A.	N.A.	N.A.	0,10		
		COV	0,48	N.A.	N.A.	N.A.	0,07		

Figura 5.2.4 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tabio Sabana de Bogotá-PE-4. (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE							ROME	CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL											
	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)		TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)
CUN-TA-NA-S3-M1	TABIO	4,935	74,105	3	1	0,7	0,9	0,8	24,713					2,67													
CUN-TA-NA-S3-M2	TABIO	4,935	74,105	3	2	1,4	1,7	1,55	29,349					2,67	95,2												
CUN-TA-NA-S3-M3	TABIO	4,935	74,105	3	3	1,7	1,95	1,825	23,032	55,4	26	29,4	1,89	2,67		CH											
CUN-TA-NA-S3-M4	TABIO	4,935	74,105	3	4	2,05	2,35	2,2	25,159					2,67													
CUN-TA-NA-S3-M5	TABIO	4,935	74,105	3	5	3	3,3	3,15	25,038				1,77	2,67			1,77	2,67	37,3	30,5	92,6	97,9	1,08	0,42	0,04	1,1	
CUN-TA-NA-S3-M6	TABIO	4,935	74,105	3	6	3,6	3,9	3,75	21,811	32,3	27	5,26	1,93	2,78		ML											
CUN-TA-NA-S3-M7	TABIO	4,935	74,105	3	7	4,1	4,25	4,175	26,829					2,78													
CUN-TA-NA-S3-M8	TABIO	4,935	74,105	3	8	4,4	4,7	4,55	28,718	34,1	22,2	11,9		2,78		CL											
CUN-TA-NA-S3-M9	TABIO	4,935	74,105	3	9	5,3	5,7	5,5	25,166	39,3	23,3	16		2,78		CL											
CUN-TA-NA-S3-M10	TABIO	4,935	74,105	3	10	6	6,3	6,15	30,129	35,8	23	12,8		2,78		CL											

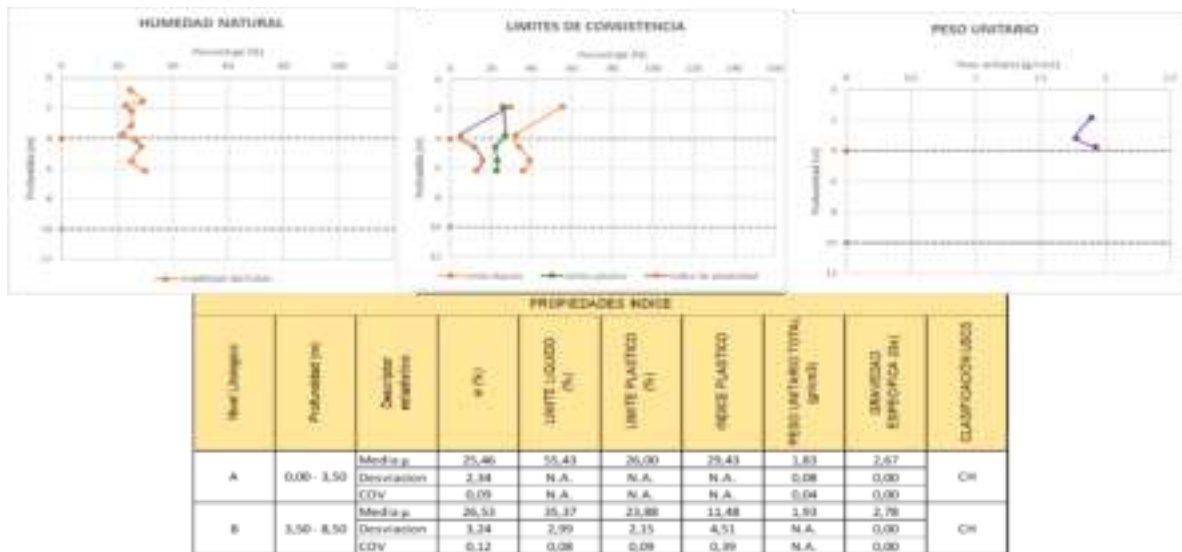
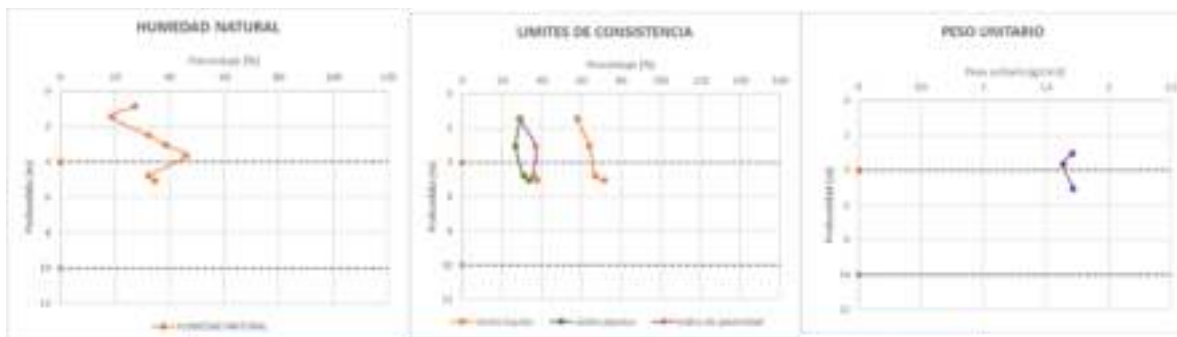


Figura 5.2.5 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tabio Sabana de Bogotá-S3 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	TIPO DE INFORMACION	CODIGO PROYECTO	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	LOCALIZACION							TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	PROPIEDADES INDICE							ROME
					COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)								GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS					
CUN-TA-NA-S5-M1	NATIVA	RG-04	CUNDINAMARCA	TABIO	4,93358	74,084	SONDEO	A	5	1	0,2	0,66	0,43	26,361												
CUN-TA-NA-S5-M2	NATIVA	RG-04	CUNDINAMARCA	TABIO	4,93358	74,084	SONDEO	I	5	2	1,06	1,32	1,19	26,915												
CUN-TA-NA-S5-M3	NATIVA	RG-04	CUNDINAMARCA	TABIO	4,93358	74,084	SONDEO	I	5	3	2,9	3,3	3,1	25,784												
CUN-TA-NA-S5-M4	NATIVA	RG-04	CUNDINAMARCA	TABIO	4,93358	74,084	SONDEO	A	5	4	3,3	3,7	3,5	36,747	47,5	27,1	20,4	CL								
CUN-TA-NA-S5-M5	NATIVA	RG-04	CUNDINAMARCA	TABIO	4,93358	74,084	SONDEO	I	5	5	3,7	4,1	3,9	32,613												

Figura 5.2.6 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tabio Sabana de Bogotá-S6 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION								PROPIEDADES INDICE					RIA MROME		
	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS
CUN-TA-NA-S6-M1	TABIO	4,99192	74,071	6	1	0,7	1	0,85	27,359					2,81		
CUN-TA-NA-S6-M2	TABIO	4,99192	74,071	6	2	1,3	1,6	1,45	18,898	58	29,4	28,6		2,81		CH
CUN-TA-NA-S6-M3	TABIO	4,99192	74,071	6	3	2,4	2,6	2,5	32,405					2,81		
CUN-TA-NA-S6-M4	TABIO	4,99192	74,071	6	4	2,9	3,2	3,05	38,463	64	27	37	1,71	2,81	88,2	CH
CUN-TA-NA-S6-M5	TABIO	4,99192	74,071	6	5	3,5	3,8	3,65	45,99				1,64	2,81		
CUN-TA-NA-S6-M6	TABIO	4,99192	74,071	6	6	4,65	4,9	4,775	32,405	67	31	36		2,81	81,2	CH
CUN-TA-NA-S6-M7	TABIO	4,99192	74,071	6	7	4,9	5,2	5,05	34,683	71,5	33,8	37,7	1,71	2,81	81,2	CH



Mue. Litológica	Profundidad (m)	Descripción detallada	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50		29,28	40,98	28,21	32,77	1,71	2,81	CH
B	3,50 - 8,50		37,69	69,24	32,40	36,84	1,68	2,81	CH

Figura 5.2.7 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tabio Sabana de Bogotá-S5 (fuente propia)

PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	32,05	63,90	26,22	37,68	1,74	2,76	CH
		Desviacion estandar $\sigma$	10,70	15,17	4,47	12,29	0,14	0,07	
		COV	0,33	0,24	0,17	0,33	0,08	0,03	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	42,31	61,30	28,03	33,28	1,67	2,79	CH
		Desviacion estandar $\sigma$	25,28	43,38	13,15	31,32	0,27	0,02	
		COV	0,60	0,71	0,47	0,94	0,16	0,01	

COMPRESION INCONFINADA							
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	qu INCONFINAD A (kg/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	62,29	1,54	1,00	0,98	9,03
		Desviacion estandar $\sigma$	36,78	0,33	0,42	0,74	6,89
		COV	0,59	0,21	0,42	0,76	0,76
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	65,60	29,32	14,08	0,76	7,50
		Desviacion estandar $\sigma$	44,64	61,87	28,91	0,32	2,08
		COV	0,68	2,11	2,05	0,42	0,28

Nivel Litológico	Profundidad (m)	COLAPSABILIDAD					GRADO EXPANSIÓ	ACTIVIDAD COLOIDAL		
		DENISON	CLASIFICACIÓN	PRIKLOSNIKY	CLASIFICACIÓN	U.R.S.S	CLASIFICACIÓN	RAMAN	SKEMPTON	CLASIFICACIÓN
A	0,00 - 3,50	2,28	Suelo no Colapsable	0,23	Tendencia a No colapsar	-0,48	No colapsa	MUY ALTO	0,21	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO
B	3,50 - 8,50	1,59	Suelo no colapsable	0,41	Suelos expansibles	-0,27	No tiende a colapsar	MEDIO - ALTO	0,33	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN BAJO

Tabla 5.2.1. Análisis estadístico por nivel litológico información secundaria Sabana de Bogotá (fuente propia)

**ANEXO 5.2.2**  
**ZONA PILOTO 2**



CODIGO INTERNO DE MUESTRA	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	LOCALIZACION					PROPIEDADES INDICE					ROMÉ	CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL											
			PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)		CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)	
QUI-AR-NA-AP1-M1	QUINDIO	ARMENIA	1	1	0,2	0,5	0,35	34,1																	
QUI-AR-NA-AP1-M2	QUINDIO	ARMENIA	1	2	1,2	1,5	1,35	27,5																	
QUI-AR-NA-AP1-M3	QUINDIO	ARMENIA	1	3	1,5	1,8	1,65	21,4																	
QUI-AR-NA-AP1-M4	QUINDIO	ARMENIA	1	4	2,1	2,4	2,25	60	50,7	38,8	11,9		ML												
QUI-AR-NA-AP1-M5	QUINDIO	ARMENIA	1	5	2,4	2,7	2,55	73,2	59,7	49,3	10,4	1,44	MH	1,44	2,4	73,3	47,2	92,9	97,6	1,89	0,75	0,08	1,1		
QUI-AR-NA-AP1-M6	QUINDIO	ARMENIA	1	6	3	3,2	3,1	38,8				1,68		1,68	2,36	39,6	30,4	97,2	98,6	0,96	0,3	0,03	1,6		
QUI-AR-NA-AP1-M7	QUINDIO	ARMENIA	1	7	3,3	3,5	3,4	30,9																	
QUI-AR-NA-AP1-M8	QUINDIO	ARMENIA	1	8	3,5	4,1	3,8	30	31	26,1	4,9		ML												

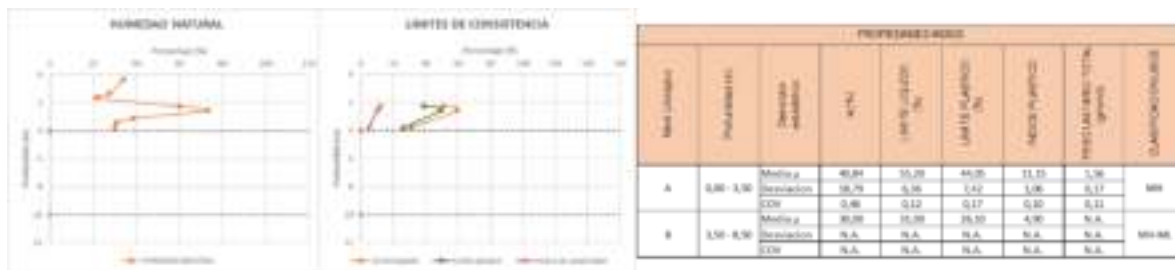


Figura 5.2.8 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindio- AP1 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	LOCALIZACION					PROPIEDADES INDICE					ROMÉ	CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL										
				PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)		CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)
QUI-AR-NA-AP3-M1	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	1	0,6	0,3	22,7																	
QUI-AR-NA-AP3-M2	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	2	1	1,35	1,175	42,7																
QUI-AR-NA-AP3-M3	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	3	1,4	1,6	1,5	56,4																
QUI-AR-NA-AP3-M4	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	4	1,7	2	1,85	53,9																
QUI-AR-NA-AP3-M5	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	5	2,6	2,85	2,725	37,6	42,1	27,3	14,8	1,63	CL	1,63	2,66	37,6	28,2	80,3	99,8	1,25	0,49	0,04	1,05	
QUI-AR-NA-AP3-M7(1)	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	7(1)	3,5	3,7	3,6	37,8	45,1	36,8	8,3		ML											
QUI-AR-NA-AP3-M7	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	7	3,5	4,1	3,8	53,3																
QUI-AR-NA-AP3-M8	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	8	4,3	4,8	4,55	58,4																
QUI-AR-NA-AP3-M9	QUINDIO	ARMENIA	APIQUE	3	9	5	5,2	5,1	43,3																

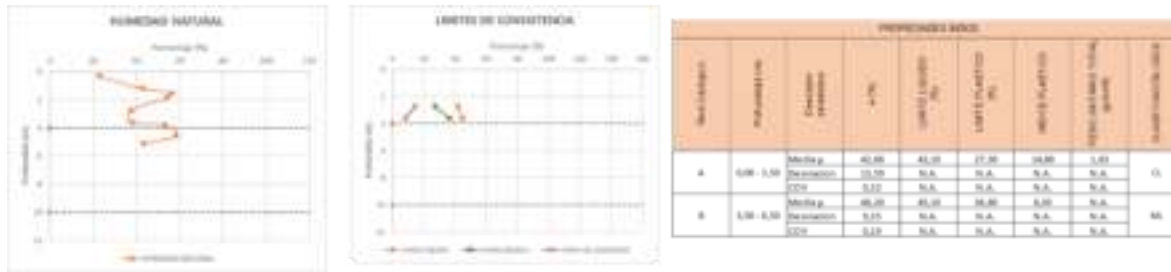


Figura 5.2.9 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- AP3 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE				CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL															
	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	ÍNDICE RAMA VIRGEN Cc	ÍNDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)	
QUI-AR-NA-AP4-M1	ARMENIA	APIQUE	4	1	1	1,4	1,2	48																
QUI-AR-NA-AP4-M2	ARMENIA	APIQUE	4	2	5,1	5,4	5,25	43,2																
QUI-AR-NA-AP4-M3	ARMENIA	APIQUE	4	3	6,3	6,7	6,5	50,5	32,8	27,8	5	1,48	ML	1,48	2,35	50,5	39	85,7	99,9	1,39	0,78	0,02	2	
QUI-AR-NA-AP4-M4	ARMENIA	APIQUE	4	4	6,7	6,9	6,8	112,2																
QUI-AR-NA-AP4-M5	ARMENIA	APIQUE	4	5	6,9	7,2	7,05	139,8	55,6	51,8	3,8		MH-OH											
QUI-AR-NA-AP4-M6	ARMENIA	APIQUE	4	6	7,8	8	7,9	141,21	47,1	41,5	5,6		ML											

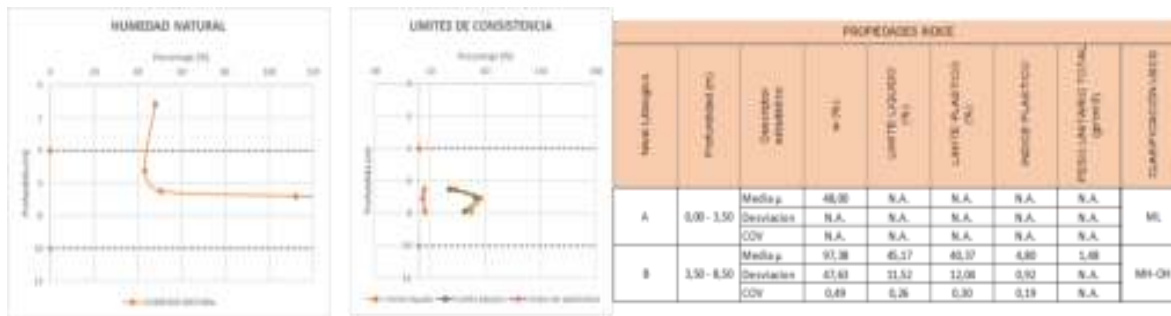
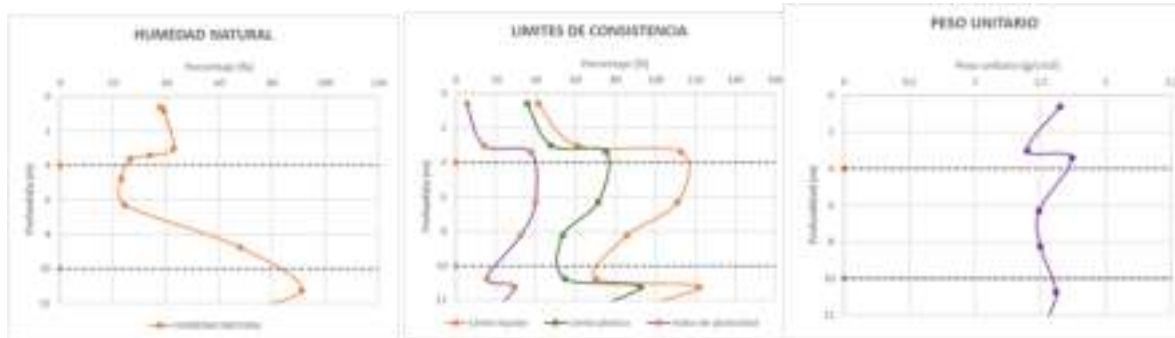


Figura 5.2.10 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- AP4 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION						PROPIEDADES INDICE						IDROMETRIA	ACION UNIDIM	ORTE DIREC		
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	PROF. MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)				CLASIFICACION USCS	INDICE RAMA VIRGEN Cc
QUI-AR-SC99-P1-M1A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	1A	0,6	38	41,4	35,9	5,5	1,65	2,65	ML			28,8	0,29
QUI-AR-SC99-P1-M1A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	1A	0,85	39,2					2,65				39,8	0,12
QUI-AR-SC99-P1-M1A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	1A	1,25						2,65					
QUI-AR-SC99-P1-M1	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	1	1,75											
QUI-AR-SC99-P1-M2	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	2	2,65											
QUI-AR-SC99-P1-M2	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	2	3,025	42,9	60,9	47,8	14,2	1,4		MH-OH				
QUI-AR-SC99-P1-M3	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	3	3,4	34	113	75,3	37,5	1,74	2,75	MH-OH	0,46	0,06		
QUI-AR-SC99-P1-M3	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	3	3,65	26,5					2,75					
QUI-AR-SC99-P1-M4	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	4	4,75	23,1							0,38	0,02		
QUI-AR-SC99-P1-M2A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	2A	5,85											
QUI-AR-SC99-P1-M5	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	5	6,3	24,5	111	71,3	39,9	1,49	2,85	MH-OH	2,43	0,02		
QUI-AR-SC99-P1-M6	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	6	6,75											
QUI-AR-SC99-P1-M3A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	3A	8,25		85,8	53,4	32,4	1,5	2,73	MH-OH				
QUI-AR-SC99-P1-M4A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	4A	8,75	68										
QUI-AR-SC99-P1-M5A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	5A	10,75		70,1	54,6	15,5	1,62		MH-OH				
QUI-AR-SC99-P1-M6A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	6A	11,25	91,1	122	92,5	29,5			MH-OH				
QUI-AR-SC99-P1-M7A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	7A	12,7	61,8				1,55						
QUI-AR-SC99-P1-M8A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	8A	13,25	62,3	60,7	48,1	12,6			MH-OH				
QUI-AR-SC99-P1-M9	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	9	14,75					1,71						
QUI-AR-SC99-P1-M9A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	9A	15,25	63,7				1,71						
QUI-AR-SC99-P1-M10A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	10A	15,75	55,5										
QUI-AR-SC99-P1-M12A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	12A	17,05					1,72						
QUI-AR-SC99-P1-M13A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	13A	17,6	52,1				1,62						
QUI-AR-SC99-P1-M14A	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	1	14A	18,25	60				1,41						

Figura 5.2.11 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-1-Parte 1 (fuente propia)

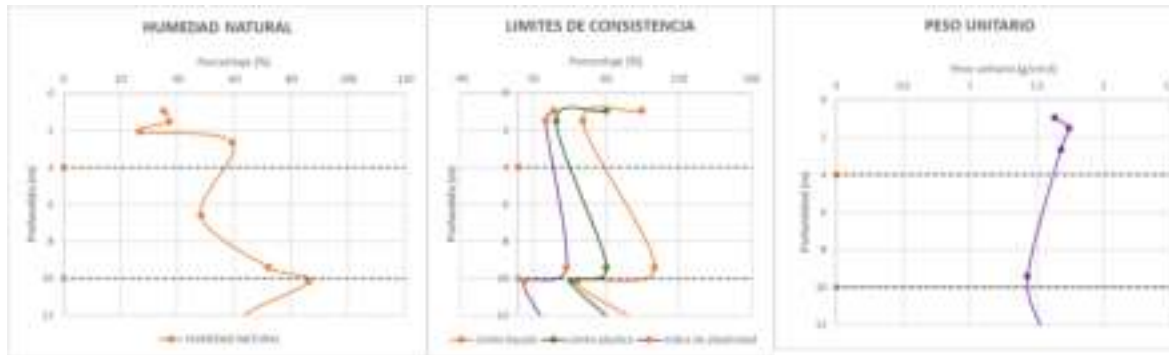


PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm³)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gst)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	38,53	71,70	53,00	19,07	1,60	2,68	MH-OH
		Desviacion	3,67	36,90	20,21	16,55	0,18	0,05	
		COV	0,10	0,51	0,38	0,87	0,11	0,02	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	24,70	98,50	62,35	36,15	1,50	2,78	MH-OH
		Desviacion	1,71	17,96	12,66	5,30	0,01	0,06	
		COV	0,07	0,18	0,20	0,15	0,00	0,02	
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	64,31	84,27	65,07	19,20	1,62	N.A.	MH-OH
		Desviacion	11,88	33,01	23,98	9,04	0,11	N.A.	
		COV	0,18	0,39	0,37	0,47	0,07	N.A.	

Figura 5.2.12 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-1-Parte 2 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE					DROMETRICACION UNID	ORTE DIREC				
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO		PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	CLASIFICACION USCS	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	ANGULO DE FRICCION $\phi$ (°)
QUI-AR-SC99-P2-M1	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	1	0,5	0,7	0,95	35,3	84,5	60,4	24,1	1,6	MH				
QUI-AR-SC99-P2-M2	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	2	0,5	0,7	1,5	37,1	44,2	25,8	18,5	1,7	CL				
QUI-AR-SC99-P2-M3	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	3	0,5	0,7	2,05	26,7								34,7	0,3
QUI-AR-SC99-P2-M3	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	3	1,5	2	2,65	59,3				1,7					
QUI-AR-SC99-P2-M4	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	4	2,5	2,8	3,1										
QUI-AR-SC99-P2-M5	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	5	2,5	2,8	4,9										
QUI-AR-SC99-P2-M6	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	6	3,3	3,5	5,45							0,46	0,06		
QUI-AR-SC99-P2-M7	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	7	3,3	3,5	6										
QUI-AR-SC99-P2-M8	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	8	4,5	5	6,6	48,3						0,38	0,02		
QUI-AR-SC99-P2-M9	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	9	5,6	6,1	9,4	72	93,4	60,4	33	1,4	MH-OH				
QUI-AR-SC99-P2-M10	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	10	6,1	6,5	10,15	86,2	40,3	36,3	4		ML-OL	2,43	0,02		
QUI-AR-SC99-P2-M11	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	11	6,5	7	12,25	63	78,2	61,8	16,4	1,5	MH-OH				
QUI-AR-SC99-P2-M12	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	12	8	8,5	13,25	97,5	71,1	55,2	15,9	1,5	CH				
QUI-AR-SC99-P2-M13	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	13	8,5	9	15,35										
QUI-AR-SC99-P2-M14	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	14	10,5	11	15,75										
QUI-AR-SC99-P2-M14	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	14	11	11,5	16,05	70,6	71,5	56,5	15		MH-OH				
QUI-AR-SC99-P2-M15	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	15	12,5	12,9	17,85		33,8	23,7	10,1	1,5	CL				
QUI-AR-SC99-P2-M16	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	16	13	13,5	18,45	60,5									
QUI-AR-SC99-P2-M17	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	17			19,85	65,7									
QUI-AR-SC99-P2-M18	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	18			20,45	73,2									
QUI-AR-SC99-P2-M20	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	20			23,15	44,6									
QUI-AR-SC99-P2-M21	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	21			24,3	123									
QUI-AR-SC99-P2-M22	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	22			26,15	96,6	110	69,6	40						
QUI-AR-SC99-P2-M23	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	2	23			26,45	68,2									

Figura 5.2.13 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-2-Parte 1 (fuente propia)

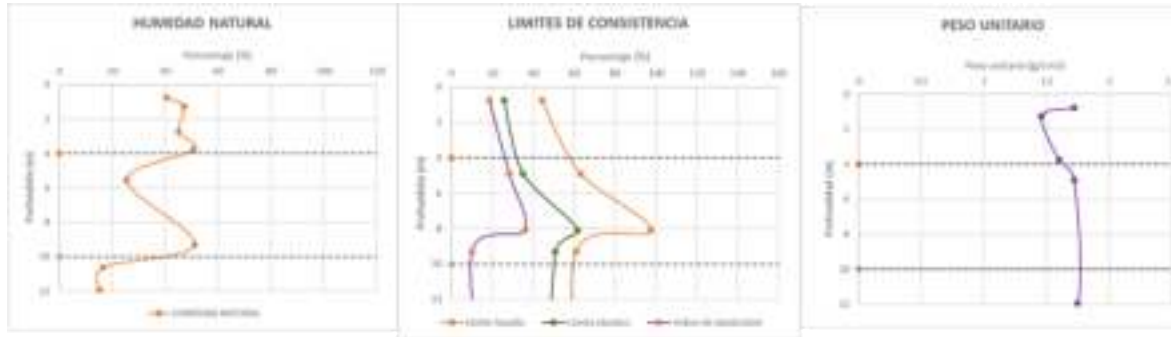


PROPIEDADES INDICE								
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm³)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	39,60	64,35	43,10	21,30	1,68	MH-CL
		Desviacion	13,90	28,50	24,47	3,96	0,06	
		COV	0,35	0,44	0,57	0,19	0,03	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	48,30	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	MH-OH
		Desviacion	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		COV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	76,76	71,13	51,93	19,20	1,48	CL
		Desviacion	20,91	26,99	16,09	12,74	0,05	
		COV	0,27	0,38	0,31	0,66	0,03	

Figura 5.2.14 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-2-Parte 2 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACION USCS	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)	ANGULO DE FRICCION $\phi$ (°)	COHESION (kg/cm2)
QUI-AR-SC99-P3-M1	ARMENIA	PERFORACION	3	1	0,5	1	0,75	40,5	44,2	25,8	18,4	1,72	2,79	CL	0,46	0,06	4,1		
QUI-AR-SC99-P3-M2	ARMENIA	PERFORACION	3	2	1	1,5	1,25	47,3				1,46							
QUI-AR-SC99-P3-M3	ARMENIA	PERFORACION	3	3	2	2,5	2,25												
QUI-AR-SC99-P3-M4	ARMENIA	PERFORACION	3	4	2,5	3	2,75	45,1											
QUI-AR-SC99-P3-M5	ARMENIA	PERFORACION	3	5	3,5	4	3,75	50,8				1,6							
QUI-AR-SC99-P3-M6	ARMENIA	PERFORACION	3	6	4,5	5,3	4,9		63,1	35	28,2	1,72	2,46	CH	0,38	0,02	6,3		
QUI-AR-SC99-P3-M7	ARMENIA	PERFORACION	3	7	5,3	5,8	5,55	25,5							2,43	0,02	3,6		
QUI-AR-SC99-P3-M8	ARMENIA	PERFORACION	3	8	7	7,8	7,4					2,93							
QUI-AR-SC99-P3-M9	ARMENIA	PERFORACION	3	9	7,8	8,4	8,1		97,5	61,7	35,9		2,9	MH-OH					
QUI-AR-SC99-P3-M10	ARMENIA	PERFORACION	3	10	9	9,6	9,3	51,2	60,8	50,8	10			MH-OH				38,7	0,1
QUI-AR-SC99-P3-M10	ARMENIA	PERFORACION	3	10	9	9,6	9,3												
QUI-AR-SC99-P3-M11	ARMENIA	PERFORACION	3	11	9,8	10,4	10,1												
QUI-AR-SC99-P3-M12	ARMENIA	PERFORACION	3	12	10,4	10,8	10,6	16,6											
QUI-AR-SC99-P3-M13	ARMENIA	PERFORACION	3	13	11,6	12,3	11,95	15,2				1,75	2,69					28,3	0,61
QUI-AR-SC99-P3-M14	ARMENIA	PERFORACION	3	14	12,3	12,8	12,55	21,5											
QUI-AR-SC99-P3-M15	ARMENIA	PERFORACION	3	15	14,5	15	14,75	45				1,43							
QUI-AR-SC99-P3-M16	ARMENIA	PERFORACION	3	16	16	16,3	16,15	43,4				1,74	2,71						
QUI-AR-SC99-P3-M16	ARMENIA	PERFORACION	3	16	16	16,3	16,15	43,4				1,74	2,71						
QUI-AR-SC99-P3-M17	ARMENIA	PERFORACION	3	17	16,7	17	16,85	19,5											
QUI-AR-SC99-P3-M20	ARMENIA	PERFORACION	3	20	18,6	19,4	19	42											
QUI-AR-SC99-P3-M21	ARMENIA	PERFORACION	3	21	19,4	19,4	19,4	54,3	63,1	46,6	16,5	1,65		MH-OH					
QUI-AR-SC99-P3-M22	ARMENIA	PERFORACION	3	22	21	21,6	21,3	30	62,6	49,8	12,8	1,84		MH-OH					
QUI-AR-SC99-P3-M23	ARMENIA	PERFORACION	3	23	21,6	22,2	21,9	62,7											

Figura 5.2.15 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-3-Parte 1 (fuente propia)



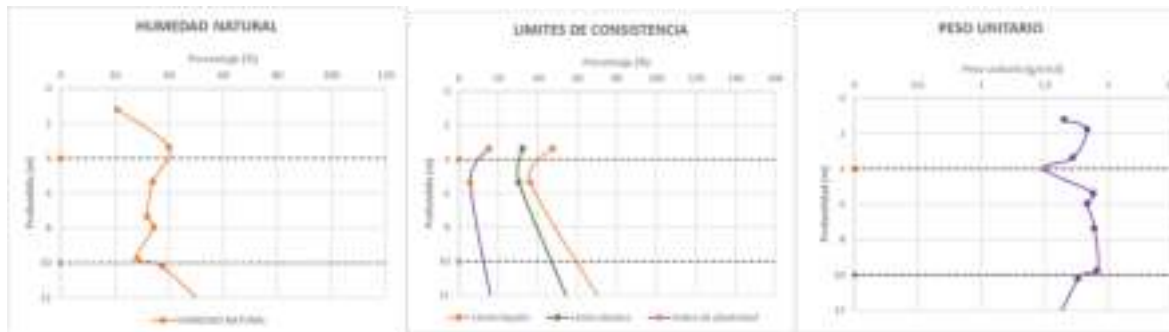
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Desviador estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gm)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	44,50	44,20	25,80	18,40	1,59	2,79	CH-CL
		Desviación	3,47	N.A.	N.A.	N.A.	0,18	N.A.	
		COV	0,08	N.A.	N.A.	N.A.	0,12	N.A.	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	38,15	80,30	48,35	32,05	1,66	2,76	MH-OH
		Desviación	17,89	24,32	18,88	5,44	0,08	0,26	
		COV	0,47	0,30	0,39	0,17	0,05	0,10	
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	37,07	62,17	49,07	13,10	1,69	2,70	MH-OH
		Desviación	16,01	1,21	2,19	5,26	0,14	0,01	
		COV	0,43	0,02	0,04	0,25	0,08	0,00	

Figura 5.2.16 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-3-Parte 2 (fuente propia)



CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE							ROMERACION UNID		ORTE DIRECT		
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACION USCS	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	ANGULO DE FRICCION $\phi$ (°)	COHESION (kg/cm2)
QUI-AR-SC99-P4-M1	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	1	0,9	1,5	1,2	21				1,65						
QUI-AR-SC99-P4-M2	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	2	1,5	2	1,75				1,83							
QUI-AR-SC99-P4-M3	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	3	3	3,7	3,35	40	47,5	32,2	15,3	1,72	2,58	ML			33,7	0,2
QUI-AR-SC99-P4-M4	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	4	3,7	4,3	4				1,5	2,44						
QUI-AR-SC99-P4-M5	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	5	5	5,7	5,35	34	36,1	30,4	5,7	1,88	2,67	ML				
QUI-AR-SC99-P4-M6	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	6	5,7	6,2	5,95				1,83	2,84		2,43	0,02			
QUI-AR-SC99-P4-M7	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	7	7	7,7	7,35	32				1,89	2,61					
QUI-AR-SC99-P4-M8	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	8	7,7	8,2	7,95	34,4				2,92						
QUI-AR-SC99-P4-M9	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	9	9,5	10	9,75	28,1				1,91						
QUI-AR-SC99-P4-M10	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	10	10	10,4	10,2	37,5				1,76						
QUI-AR-SC99-P4-M11	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	11	12,7	13,4	13,05	57,2										
QUI-AR-SC99-P4-M12	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	12	15	15,6	15,3	74,6										
QUI-AR-SC99-P4-M13	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	13	15,6	16	15,8	84,2	87,3	65,3	22	1,43		MH-OH				
QUI-AR-SC99-P4-M14	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	14	17,5	18	17,75					2,41						
QUI-AR-SC99-P4-M15	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	15	18	18,5	18,25	55,8	65,8	46,4	19,4	1,62		MH-OH				
QUI-AR-SC99-P4-M16	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	16	19,8	20,5	20,15	52,6										
QUI-AR-SC99-P4-M17	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	17	21,5	22	21,75											
QUI-AR-SC99-P4-M18	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	18	23	23,5	23,25	51,3										
QUI-AR-SC99-P4-M19	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	19	24,5	25	24,75											
QUI-AR-SC99-P4-M20	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	4	20	25	25,4	25,2											

Figura 5.2.17 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-4-Parte 1 (fuente propia)

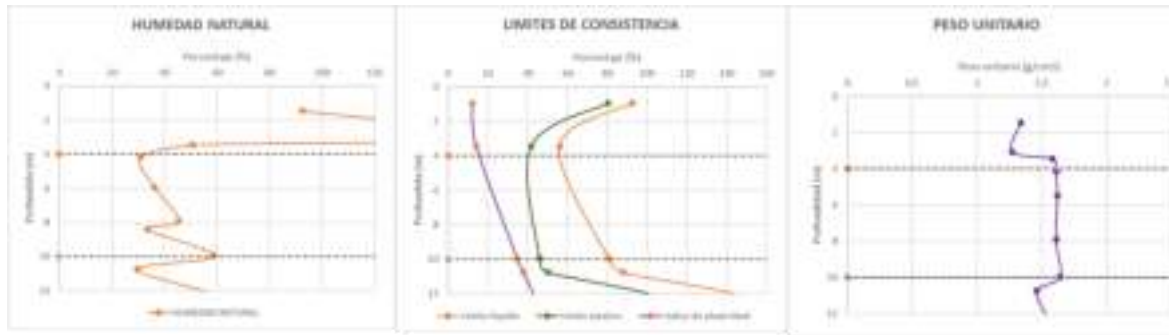


PROPIEDADES INICE									
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descripción estratigráfica	w(%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm <sup>3</sup> )	GRANEDAD ESPECIFICA (G <sub>s</sub> )	CLASIFICACION UNCS
A	0,00 - 3,50	Medio	30,50	47,50	32,20	15,30	1,73	2,58	ML
		Desviación	13,44	N.A.	N.A.	N.A.	0,09	N.A.	
		COV	0,44	N.A.	N.A.	N.A.	0,05	N.A.	
B	3,50 - 8,50	Medio	33,47	36,10	30,40	5,70	1,78	2,70	ML
		Desviación	1,29	N.A.	N.A.	N.A.	0,19	0,19	
		COV	0,04	N.A.	N.A.	N.A.	0,10	0,07	
C	Mayor a 8,5 m	Medio	55,16	76,55	55,85	20,70	1,68	2,41	MH-OH
		Desviación	18,09	15,20	13,36	1,84	0,20	N.A.	
		COV	0,33	0,20	0,24	0,09	0,12	N.A.	

Figura 5.2.18 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-4-Parte 2 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE				HIDROMETRIA	ORTE DIREC		
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF. MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)			INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)
QUI-AR-SC99-P5-M1	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	1	0,50 - 1,	0,95		92,6	80,4	12,2		MH-OH		
QUI-AR-SC99-P5-M2	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	2	1,40 - 1,	1,45	92,4				1,34			
QUI-AR-SC99-P5-M2	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	2	1,50 - 1,	1,65								
QUI-AR-SC99-P5-M3	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	3	3,00 - 3,	3,05	173,8				1,27			
QUI-AR-SC99-P5-M3	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	3	3,10 - 3,	3,45	50,7	56	41,8	14,2	1,58	MH-OH		
QUI-AR-SC99-P5-M4	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	4	3,80 - 4,	3,9								
QUI-AR-SC99-P5-M4	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	4	4,00 - 4,	4,15	31				1,61			
QUI-AR-SC99-P5-M5	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	5	5,00 - 5,	5,15								
QUI-AR-SC99-P5-M5	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	5	5,30 - 5,	5,5					1,62		37,8	0,6
QUI-AR-SC99-P5-M6	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	6	5,70 - 6,	5,95	36,4							
QUI-AR-SC99-P5-M7	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	7	7,50 - 8,	7,9	45,5				1,61			
QUI-AR-SC99-P5-M8	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	8	8,30 - 8,	8,4	33,6							
QUI-AR-SC99-P5-M8	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	8	8,50 - 8,	8,7								
QUI-AR-SC99-P5-M9	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	9	9,50 - 10	9,95	58,8	80,8	46,1	34,7	1,64	MH-OH		
QUI-AR-SC99-P5-M10	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	10	10,4 - 10	10,5								
QUI-AR-SC99-P5-M10	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	10	10,6 - 10	10,75	29,7	88	50,3	37,7	1,46	MH-OH		
QUI-AR-SC99-P5-M11	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	11	12 - 12	12,3	62,8	152	108	43,8	1,56	MH-OH	52	0,4
QUI-AR-SC99-P5-M12	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	12	12,6 - 13	12,85	73,8				1,65			
QUI-AR-SC99-P5-M13	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	13	14 - 14	14,3	131,9	155	108	47	1,18			
QUI-AR-SC99-P5-M14	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	14	14,6 - 15	14,9		75,2	51,2	24				
QUI-AR-SC99-P5-M15	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	15	16,5 - 17	16,85	49,6	60	50,5	9,5	1,6			
QUI-AR-SC99-P5-M16	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	16	17,2 - 17	17,4	61,5	72,3	49,6	22,7				
QUI-AR-SC99-P5-M17	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	17	18,5 - 19	18,85	59	51,1	43,9	7,2	1,52			
QUI-AR-SC99-P5-M18	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	18	19,2 - 19	19,45	55,8	62	47,5	14,5				
QUI-AR-SC99-P5-M19	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	19	21 - 21	21,25	52,9				1,69			
QUI-AR-SC99-P5-M20	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	20	21,5 - 21	21,6								
QUI-AR-SC99-P5-M20	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	20	21,7 - 21	21,85	66,7	77,1	50	27,1				
QUI-AR-SC99-P5-M21	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	21	23,5 - 23	23,75	52,5	63,1	46,6	16,5	1,54			
QUI-AR-SC99-P5-M22	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	22	24 - 24	24,25								
QUI-AR-SC99-P5-M23	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	23	26 - 26	26,25	60,6				1,58			
QUI-AR-SC99-P5-M24	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	24	26,5 - 26	26,75	53,8							
QUI-AR-SC99-P5-M25	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	25	28 - 28	28,4	41,8				1,6			
QUI-AR-SC99-P5-M25	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	25	28,8 - 28	28,85								
QUI-AR-SC99-P5-M26	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	26	28,9 - 29	29,05	61,5							
QUI-AR-SC99-P5-M27	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	27	31 - 31	31,05								
QUI-AR-SC99-P5-M27	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	27	31,1 - 31	31,3	59,8							
QUI-AR-SC99-P5-M28	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	28	32,6 - 32	32,65								
QUI-AR-SC99-P5-M28	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	28	32,7 - 32	32,8								
QUI-AR-SC99-P5-M29	QUINDIO	ARMENIA	PERFORACION	5	29	32,9 - 33	33,1	53,7				1,58			

Figura 5.2.19 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-5-Parte 1 (fuente propia)



PROPIEDADES INDICE										
Perfil Litológico	Profundidad (m)	Descripción estratigráfica	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm³)	GRAVEDAD ESPECIFICA (G <sub>s</sub> )	CLASIFICACION USCS	
A	0,00 - 3,50	Mediana	30,63	76,30	62,10	13,20	1,40	N.A.	MH-OH	
		Desviación	62,61	25,88	27,29	1,41	0,16	N.A.		
		COV	0,59	0,35	0,45	0,11	0,12	N.A.		
B	3,50 - 8,50	Mediana	36,63	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	1,61	N.A.	MH-OH
		Desviación	6,31	N.A.	N.A.	N.A.	0,01	N.A.	N.A.	
		COV	0,17	N.A.	N.A.	N.A.	0,00	N.A.	N.A.	
C	Mayor a 8,5 m	Mediana	40,34	85,14	59,25	25,88	1,55	N.A.	MH-OH	
		Desviación	20,26	35,37	34,23	13,54	0,13	N.A.		N.A.
		COV	0,34	0,42	0,41	0,52	0,08	N.A.		N.A.

Figura 5.2.20 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- P-5-Parte 2 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE										FORMA	DILACION UNIDIMENSIONAL	PORTE DIRECTO					
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm³)	GRAVEDAD ESPECIFICA (G <sub>s</sub> )	CLASIFICACION USCS	INDICE RAMA VIRGEN C <sub>c</sub>				INDICE DE RECOMPRESION C <sub>r</sub>	CARGA PRECONSOLIDACION (kg/cm²)	ANGULO DE FRICCION φ (°)	COHESION (kg/cm²)	
QUI-AR-SC99-T4-M1	QUINDIO	ARMENIA	TRINCHERA	A	4	1	8,3	9,2	8,75	4,8															
QUI-AR-SC99-T4-M2	QUINDIO	ARMENIA	TRINCHERA	A	4	2	10,8	11,8	11,3	61	47,8	34,2	13,7	1,57	2,75	ML	0,37	0,03	3,1	45	0,25				

Figura 5.2.21 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- T4 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE				IDROMETRIA		ORTE DIRECTA				
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	(%) ARCILLA MENOR DE 2 MICRAS	CLASIFICACION USCS	ANGULO DE FRICCION $\phi$ (°)	COHESION (kg/cm2)
QUI-AR-SC99-T5-M1	QUINDIO	ARMENIA	TRINCHERA	A	5	1	7,5	8,4	7,95	78,2				1,32				
QUI-AR-SC99-T5-M2	QUINDIO	ARMENIA	TRINCHERA	A	5	2	5	6	5,5		37,2	31,2	6			ML	36,9	1

Figura 5.2.22 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- T5 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE				ROMEDAD		DILACION UNIDIMENSIONAL		ORTE DIRECTA				
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (gs)	CLASIFICACION USCS	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)	ANGULO DE FRICCION $\phi$ (°)	COHESION (kg/cm2)
QUI-AR-SC99-T8-M1	QUINDIO	ARMENIA	TRINCHERA	8	1	1	2	1,5	30	63,7	37,9	25,8	1,41	2,45	MH	0,57	0,01	2,1	44,5	0,2
QUI-AR-SC99-T8-M2	QUINDIO	ARMENIA	TRINCHERA	8	2	3,1	4	3,55	79,9					2,64		0,9	0,04	3,5	0,28	24,4

Figura 5.2.23 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Armenia- Quindío- T8 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE							RANULOMETRIA MISMA ENTIDAROME				CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL														
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	TAMIZ No. 4 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 100 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)	
QUI-TE-NA-T2-M1	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	1	0,8	1,2	1	36,431	48,7	33,9	14,8						CH											
QUI-TE-NA-T2-M2	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	2	1,2	1,6	1,4	39,5											1,71	2,6	40,9	35,2	93,1	99,8	1,14	0,34	0,01	2
QUI-TE-NA-T2-M3	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	3	2,65	2,81	2,73	40,9																				
QUI-TE-NA-T2-M4	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	4	2,81	2,95	2,88	42,798																				
QUI-TE-NA-T2-M5	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	5	4,15	4,3	4,225	45,249	54,2	48,6	5,6						CH											
QUI-TE-NA-T2-M6	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	6	4,3	4,6	4,45	56,244																				
QUI-TE-NA-T2-M7	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	7	4,9	5,05	4,975	58,827	65,3	51,2	14,1						CH											
QUI-TE-NA-T2-M8	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	8	5,05	5,3	5,175	47,9																				
QUI-TE-NA-T2-M9	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	9	8,35	8,7	8,525	40,266	50,1	36,2	14						CH											
QUI-TE-NA-T2-M10	QUINDIO	TEBAIDA		SONDEO	2	10	6,9	7,05	6,975	48,315				100	98,7	97,9	97	93,2												

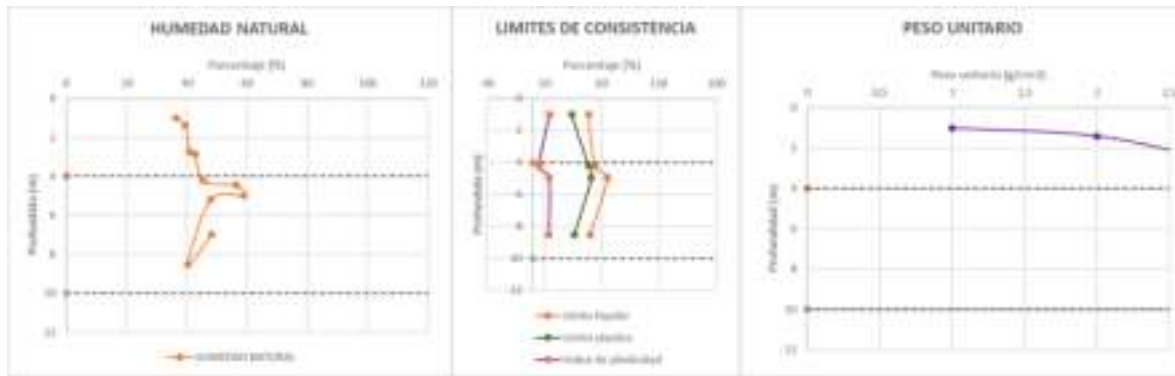


Figura 5.2.24 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tebaida- Quindío- T2 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE							RANULOMETRIA MISMA ENTIDAROME				CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL															
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	COORDENADA NORTE	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	TAMIZ No. 4 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 100 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)
QUI-TE-NA-T3-M1	QUINDIO	LA TEBAIDA		SONDEO	3	1	1,4	1,7	1,55	39,913						100	100	98,7	91,1	78,7											
QUI-TE-NA-T3-M2	QUINDIO	LA TEBAIDA		SONDEO	3	2	2,8	2,9	2,85	35,358	38,4	30,7	7,7								CL										
QUI-TE-NA-T3-M3	QUINDIO	LA TEBAIDA		SONDEO	3	3	3,1	3,5	3,3	30,005				1,85	2,51							1,85	2,51	30,1	19,9	99,3	99,8	0,76	0,27	0,02	1,3
QUI-TE-NA-T3-M4	QUINDIO	LA TEBAIDA		SONDEO	3	4	4,2	4,6	4,4	48,997						100	99,6	98,7	95,7	89,9											
QUI-TE-NA-T3-M5	QUINDIO	LA TEBAIDA		SONDEO	3	5	6,1	6,3	6,2	44,71																					
QUI-TE-NA-T3-M6	QUINDIO	LA TEBAIDA		SONDEO	3	6	6,7	7,3	7	40,19				1,71	2,65							1,71	2,65	44,6	41,7	95,7	99,6	1,24	0,24	0,02	0,9

PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	35,09	38,40	30,70	7,70	1,85	2,51	CL
		Desviación	4,96	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		COV	0,14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	44,63	N.A.	N.A.	N.A.	1,71	2,65	CL
		Desviación	4,40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		COV	0,10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

Figura 5.2.25 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tebaida- Quindío- T3 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE										RANULOMETRIA MISMA ENTIDAD		DROMETR	CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL															
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	TAMIZ No. 4 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA		TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 60 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (TMB)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)		
QUI-TE-NA-T5A-M1	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	1	0,4	0,6	0,5	30,4					2,69	100	100	99,4	82,4	61,2														
QUI-TE-NA-T5A-M2	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	2	1,2	1,5	1,35	33					2,63	100	100	94,1	65,1	47,6														
QUI-TE-NA-T5A-M3	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	3	2,8	3,1	2,95	31,9					100	100	89,1	57,4	40,5															
QUI-TE-NA-T5A-M4	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	4	3,4	4	3,7	39,7																								
QUI-TE-NA-T5A-M5	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	5	4,1	4,3	4,2	67,8					100	100	97,3	86,4	75,9															
QUI-TE-NA-T5A-M6	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	6	4,3	4,7	4,5	70,9					100	100	98,8	91,2	81,5															
QUI-TE-NA-T5A-M7	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	7	4,8	5	4,9	54,7	70,7	44,2	26,5	2,54																				
QUI-TE-NA-T5A-M8	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	8	5	5,2	5,1	45				1,64																				
QUI-TE-NA-T5A-M9	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	9	5,2	5,4	5,3	55,1	85,2	49	36,2	2,56																				
QUI-TE-NA-T5A-M10	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	10	5,4	5,7	5,55	55,2																								
QUI-TE-NA-T5A-M11	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	11	5,8	6	5,9	52,1	94,3	47,6	46,7	1,6																				
QUI-TE-NA-T5A-M12																																	
QUI-TE-NA-T5A-M13	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	12	6	6,3	6,15	53,1																								
QUI-TE-NA-T5A-M14	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	13	6,5	6,7	6,6	51,3	53	40,5	12,5																					
QUI-TE-NA-T5A-M15	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	14	6,8	7	6,9	48,4																								
QUI-TE-NA-T5A-M16	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	15	7,3	7,5	7,4	46,6	65,4	39,9	25,5																					
QUI-TE-NA-T5A-M17	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	16	7,5	8,1	7,8	55																								
QUI-TE-NA-T5A-M17	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	5A	17	8,1	8,55	8,325	55	89,7	52	37,7																					

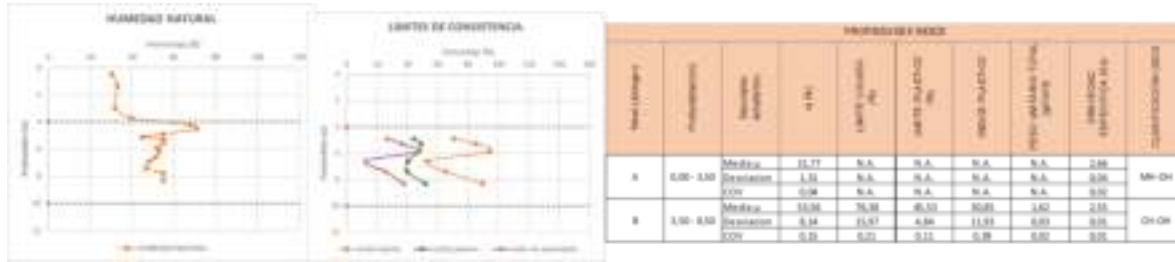


Figura 5.2.26 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tebaida- Quindío- T5A (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION						PROPIEDADES INDICE						RANULOMETRIA MISMA ENTIDAD						ROMET
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	TAMIZ No. 4 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 100 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	
QUI-TE-NA-T7-M1	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	1	0,4	0,7	0,55	49,6	52,7	36,9	15,8							ML
QUI-TE-NA-T7-M2	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	2	0,9	1,2	1,05	47,2										
QUI-TE-NA-T7-M3	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	3	1,4	1,6	1,5	46,4	49,5	37,7	11,8							ML
QUI-TE-NA-T7-M4	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	4	2,4	2,8	2,6	32,4				2,76						
QUI-TE-NA-T7-M5	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	5	3,2	3,4	3,3	36,6	34,1	27,5	6,7							ML
QUI-TE-NA-T7-M6	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	6	3,8	4,4	4,1	44,3					100	100	87,5	50,1	48	
QUI-TE-NA-T7-M7	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	7	5	5,3	5,15	37,6				2,63						
QUI-TE-NA-T7-M8	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	8	5,8	6,1	5,95	41,2										
QUI-TE-NA-T7-M9	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	9	6,5	6,6	6,55	55,7										
QUI-TE-NA-T7-M10	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	10	6,7	7	6,85	62,5										
QUI-TE-NA-T7-M11	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	7	11	7,35	7,6	7,475	52,3	80,7	54	26,7		100	100	99,5	96,5	92,7	MH



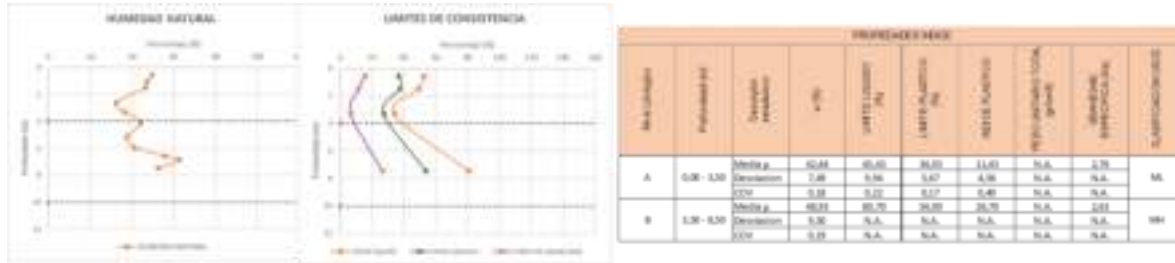


Figura 5.2.27 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tebaida- Quindío- T7 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES ÍNDICE										RANULOMETRIA MISMA ENTIDA						CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL									
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm <sup>3</sup> )	TAMIZ No. 75 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 100 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VAGIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	COMPRESION UNIDIMENSIONAL (Kg/cm <sup>2</sup> )					
QUI-TE-NA-T9-M1	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	9	1	1,5	1,8	1,65	53,456					100	100	95,2	80	60,6															
QUI-TE-NA-T9-M2	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	9	2	2	2,3	2,15	37,922					100	100	99	82,8	59															
QUI-TE-NA-T9-M3	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	9	3	6,65	7,1	6,875	41,644																								
QUI-TE-NA-T9-M4	QUINDIO	LA TEBADA	SONDEO	9	4	7,8	8,05	7,925	98,315	70,1	59,4	10,8	1,34						1,34	2,66	96,7	85,2	88,8	96,9	2,89	0,83	0,02	1,7					

Figura 5.2.28 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Tebaida- Quindío- T9 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION			PROPIEDADES INDICE										RANULOMETRIA MISMA ENTIDAD COME					CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL					COMPRESION INCONFINADA											
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gp)	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 20 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 60 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 80 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (TM3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VAGIOS INICIAL (e0)	INDICE FOM VIREN Cc	INDICE DE RECOMPRESION C <sub>r</sub>	PRECONSOLIDACION (kg/cm2)	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm3)	PESO UNITARIO SECO (g/cm3)	DEFORMACION UNITARIA	
QUI-MON-NA-MS1-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	1	0,6	0,8	0,7	52	54,1	41,8	12,3								MH															
QUI-MON-NA-MS1-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	2	1	1,2	1,1	38,2	38,1	29,3	8,8								NL															
QUI-MON-NA-MS1-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	3	1,6	1,8	1,7	36,9																										
QUI-MON-NA-MS1-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	4	2,2	2,32	2,26	74,1	51,4	44,7	6,7	1,3	2,43						MH											74,09	1,3	0,75	0,65	2,56
QUI-MON-NA-MS1-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	5	2,9	3,1	3	37,4						100	100	88	60,2	43,9																
QUI-MON-NA-MS1-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	6	4,2	4,3	4,25	70,5				1,39	2,6							1,39	2,6	70,5	58,9	83,9	99,8	2,18	1,03	0,07	1,7					
QUI-MON-NA-MS1-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	7	4,8	5	4,9	48						100	100	90,1	66,2	52																
QUI-MON-NA-MS1-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	8	5,5	5,6	5,55	55,1																										
QUI-MON-NA-MS1-M9	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	9	6	6,2	6,1	55						100	100	86,5	66,9	54																
QUI-MON-NA-MS1-M10	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	10	6,7	6,8	6,75	54,8																										
QUI-MON-NA-MS1-M11	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	1	11	7,1	7,2	7,15	113,1	62,3	48,7	13,6								MH															

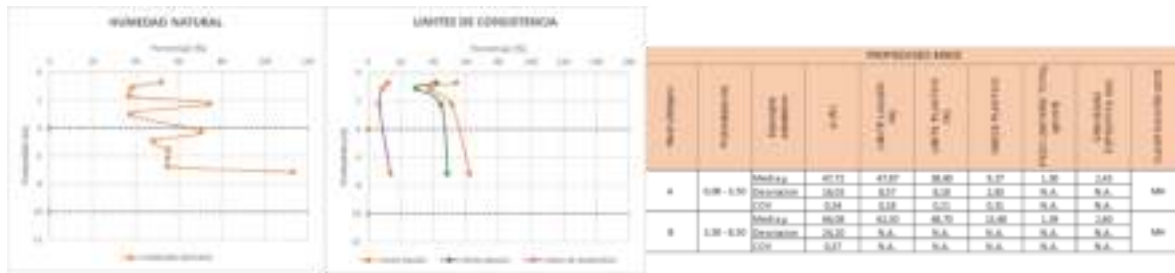


Figura 5.2.29 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-1 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION			PROPIEDADES INDICE										RIA M		HIDROMETRIA			CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL																
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gp)	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	GRAVEDAD ESPECIFICA (% DE ARCILLA)	(%) DE LIMO	(%) ARCILLA MENOR DE 2 MICRAS	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (TM3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VAGIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION C <sub>r</sub>	CARGA PRECONSOLIDACION (kg/cm2)						
QUI-MON-NA-MS2-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	1	0,4	0,5	0,45	32,5	48,1	36,7	11,4																							
QUI-MON-NA-MS2-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	2	0,7	0,8	0,75	31,1				1,51		44,3																				
QUI-MON-NA-MS2-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	3	1,5	1,63	1,565	58,2				1,51	2,65								1,51	2,65	58,2	55,7	87	99,8	1,77	0,57	0,04	2,45				
QUI-MON-NA-MS2-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	4	2,4	2,6	2,5	69,2	62,8	48,9	14								MH															
QUI-MON-NA-MS2-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	5	3,3	3,6	3,45	46,3																										
QUI-MON-NA-MS2-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	6	4,3	4,5	4,4	78,8							2,6	5,4	28,3	5,4																
QUI-MON-NA-MS2-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	7	4,7	4,8	4,75	72,3																										
QUI-MON-NA-MS2-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	8	5,5	6,05	5,775	60,3																										
QUI-MON-NA-MS2-M9	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	2	9	7,3	7,6	7,45	48,6																										

Figura 5.2.30 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-2 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION						PROPIEDADES INDICE						RI A M	HIDROMETRIA				CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL														
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO		PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA	TAMIZ No. 200 (%) (QUE PASA)	GRAVEDAD ESPECIFICA	(%) DE ARGILLA	(%) DE LIMO	(%) ARGILLA MENOR DE 2 MICRAS	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE PARA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (kg/cm2)	
QUI-MON-NA-MS3-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	1	0,2	0,3	30,1																								
QUI-MON-NA-MS3-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	2	0,6	0,7	0,65	41,2																							
QUI-MON-NA-MS3-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	3	1,5	1,6	1,55	60,1	55	44,5	10,5									MH											
QUI-MON-NA-MS3-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	4	2,4	2,6	2,5	36,9						54,1	2,6	8,2	28	8,2													
QUI-MON-NA-MS3-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	5	3,5	3,6	3,55	77,9			1,37	2,59									1,37	2,59	77,9	76,3	85,2	99,7	2,37	0,44	0,06	1,8	
QUI-MON-NA-MS3-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	6	4,1	4,65	4,375	30,4																							
QUI-MON-NA-MS3-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	7	5,6	5,8	5,7	47,1					2,44																		
QUI-MON-NA-MS3-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	3	8	7,4	7,6	7,5	63,5			1,43	2,63									1,43	2,63	63,5	48,2	82,8	99,9	2,02	0,92	0,05	2,5	

PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litologico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	42,08	55,00	44,50	10,50	N.A.	N.A.	MH
		Desviacion	12,86	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		COV	0,31	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	54,73	N.A.	N.A.	N.A.	1,40	2,55	MH
		Desviacion	20,53	N.A.	N.A.	N.A.	0,04	0,10	
		COV	0,38	N.A.	N.A.	N.A.	0,03	0,04	

Figura 5.2.31 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-3 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION								PROPIEDADES INDICE						RI A M	ROME
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)		
QUI-MON-NA-MS4-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	1	0,8	1	0,9	56,6						
QUI-MON-NA-MS4-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	2	1,35	1,6	1,475	58,6				1,57		
QUI-MON-NA-MS4-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	3	2,4	2,6	2,5	49,7	42,5	30,9	11,6			ML
QUI-MON-NA-MS4-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	4	3	3,18	3,09	47,8	61,4	46	15,4		63,2	MH
QUI-MON-NA-MS4-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	5	3,25	3,8	3,525	47						
QUI-MON-NA-MS4-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	6	4,2	4,4	4,3	34,6						
QUI-MON-NA-MS4-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	7	4,5	5,05	4,775	63,1						
QUI-MON-NA-MS4-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	8	5,6	5,8	5,7	44,1						
QUI-MON-NA-MS4-M9	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		4	9	6,4	6,5	6,45	43,8						

PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litologico	Profundidad (m)	Descriptor estadistico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACION USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	53,18	51,95	38,45	13,50	1,57	N.A.	ML-MH
		Desviacion	5,23	13,36	10,68	2,69	N.A.	N.A.	
		COV	0,10	0,26	0,28	0,20	N.A.	N.A.	

Figura 5.2.32 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-4 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE				RANLOMETRIA MISMA ENTIDA				HIDROMETRIA				CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL				COMPRESION INCONFINADA																				
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	RESISTENCIA COMPRESION TOTAL (kg/cm2)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gp)	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 20 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 60 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 100 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	GRAVEDAD ESPECIFICA	(%) DE ARCILLA	(%) DE LIMO	(%) ARCILLA MENOR DE 2 MICRAS	PLASIFICACION USCS	RESO UNITARIO (T/M3)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VAGIOS	INDICE DE COMPACTACION	INDICE DE BARRA VIRGEN Cc	PRECONSOLIDACION Cc (kg/cm2)	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm3)	PESO UNITARIO SECO (g/cm3)	INDICE DE INGENIERIA	DEFORMACION UNIFORME		
QUI-MON-NA-MSS-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	1	0,9	1,1	1	30,8																																
QUI-MON-NA-MSS-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	2	1,6	1,8	1,7	28,3						100	100	90,5	61,5	46																						
QUI-MON-NA-MSS-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	3	2,3	2,6	2,45	66,4	65	46,2	18,8	1,37											MH											66,41	1,35	0,81	0,35	1,12		
QUI-MON-NA-MSS-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	4	2,95	3,15	3,05	46,5																																
QUI-MON-NA-MSS-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	5	4	4,35	4,175	27,5																																
QUI-MON-NA-MSS-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	6	4,8	4,9	4,85	46,1						100	100	84,5	57,6	48,2																						
QUI-MON-NA-MSS-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	7	5,6	5,64	73,9	46,1	35,9	10,2	1,37	2,6											ML	1,37	2,6	73,9	62,2	83,7	99,7	2,3	1,03	0,03	2,6							
QUI-MON-NA-MSS-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	8	7,2	7,4	7,3	50,7																																
QUI-MON-NA-MSS-M9	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	5	9	7,8	8	7,9	50,7																																

LOCALIZACION			ENSAYO TRIAXIAL CONSOLIDADO NO DRENADO (CU)																		
SONDEO	MUESTRA No	PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	PRES. CAMARA (kg/cm2) PUNTO 1	PRES. POROS INICIAL (kg/cm2) PUNTO 1	ESFUERZO EFECTIVO INICIAL (kg/cm2) PUNTO 1	HUMEDAD INICIAL (%) PUNTO 1	HUMEDAD FINAL (%) PUNTO 1	PRES. CAMARA (kg/cm2) PUNTO 2	PRES. POROS INICIAL (kg/cm2) PUNTO 2	ESFUERZO EFECTIVO INICIAL (kg/cm2) PUNTO 2	HUMEDAD INICIAL (%) PUNTO 2	HUMEDAD FINAL (%) PUNTO 2	PRES. CAMARA (kg/cm2) PUNTO 3	PRES. POROS INICIAL (kg/cm2) PUNTO 3	ESFUERZO EFECTIVO INICIAL (kg/cm2) PUNTO 3	HUMEDAD INICIAL (%) PUNTO 3	HUMEDAD FINAL (%) PUNTO 3	COHESION NO DRENADA (kg/cm2)	ANGULO DE FRICCION (gr)	PRESION DE POROS (SI-N)
QUI-MON-NA-MS5-M1	1	0,9-1,1	1																		
QUI-MON-NA-MS5-M2	2	1,6-1,8	1,7																		
QUI-MON-NA-MS5-M3	3	2,3-2,6	2,45	1,2	1	0,2	63,8	87,7	1,6	1	0,6	63,8	87,7	2	1	1	63,8	87,7	0,2	23,6	SI
QUI-MON-NA-MS5-M4	4	3,1-3,15	3,05																		
QUI-MON-NA-MS5-M5		4-4,35	4,18																		
QUI-MON-NA-MS5-M6		4,8-4,9	4,85																		
QUI-MON-NA-MS5-M7		5,6-5,6	5,64																		
QUI-MON-NA-MS5-M8		7,2-7,4	7,3																		
QUI-MON-NA-MS5-M9		7,8-8	7,9																		

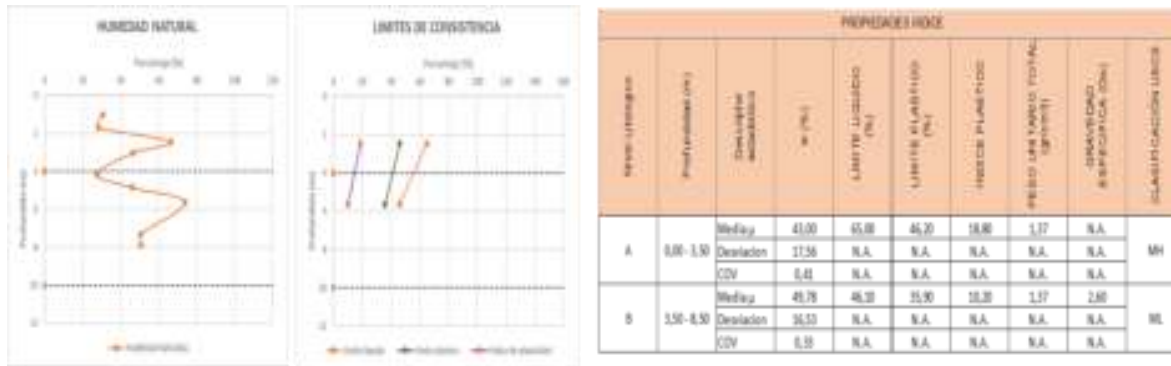


Figura 5.2.33 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-5 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE										CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL										COMPRESION INCONFINADA												
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO (%)	PESO UNITARIO TOTAL	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gd)	TAMIZ No. (No) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	PROMET	PESO UNITARIO (TMS)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VAGOS INICIAL (e0)	INDICE NAT. VIRGEN (e2)	INDICE DE RECOMPRESION C1	CARGA PRECONSOLIDACION (kg/cm2)	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm3)	PESO UNITARIO SECO (g/cm3)	qu INCONFINADA (kg/cm2)	DEFORMACION UNITARIA				
QUI-MON-NA-MS6-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	1	0,4	0,6	0,5	18,6								73,7																				
QUI-MON-NA-MS6-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	2	1,4	1,6	1,5	24,4																												
QUI-MON-NA-MS6-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	3	2	2,3	2,15	50,8	55,1	33,6	21,5	1,56	2,51			MH																				
QUI-MON-NA-MS6-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	4	2,9	3,1	3	47,7	46,3	31	15,2					ML	1,54	2,63	52,8	47,6	86,7	99,9	1,6	0,34	0,06	2,4										
QUI-MON-NA-MS6-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	5	3,6	3,8	3,7	39,2	41,4	29,9	11,5					ML																				
QUI-MON-NA-MS6-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	6	4,2	4,35	4,275	38,1				1,63																								
QUI-MON-NA-MS6-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	7	5,9	6,1	6	46,9	64,5	37,7	26,8					MH																				
QUI-MON-NA-MS6-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	6	8	7	7,2	7,1	53,2				1,54	2,63																							



Figura 5.2.34 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-6 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE										HIDROMETRIA		CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL							COMPRESION INCONFINADA												
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (kg/cm <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	GRAVEDAD ESPECIFICA	(%) DE ARCILLA	(%) DE LIMO MENOR DE 2 MICRAS	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M <sup>3</sup> )	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL	INDICE RAMA VIRGEN	INDICE DE COMPRESION Cc	PRECONSOLIDACION (Kg/cm <sup>2</sup> )	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	QU INCONFINADA (kg/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA		
QUI-MON-NA-MS7-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	7	1	0,5	0,7	0,6	20,5																											
QUI-MON-NA-MS7-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	7	2	1,1	1,3	1,2	58,1	41,1	35,4	5,7	1,44						ML	1,56	2,59	29,9	31,1	67,3	99,6	1,15	0,33	0,05	1,5	58,14	1,44	0,91	0,56	2,13		
QUI-MON-NA-MS7-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	7	3	2,9	3,1	3	29,9				1,56	2,59																						
QUI-MON-NA-MS7-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	7	4	4	4,2	4,1	43,2							63,3																				
QUI-MON-NA-MS7-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	7	5	4,9	5,1	5	50,2								2,6	6,7	29,6	6,7																
QUI-MON-NA-MS7-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	7	6	6,7	6,9	6,8	47,2	42,4	35,4	7,1					2,6	13,5	30,3	13,5	ML															
QUI-MON-NA-MS7-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	7	7	7,15	7,3	7,225	87																											

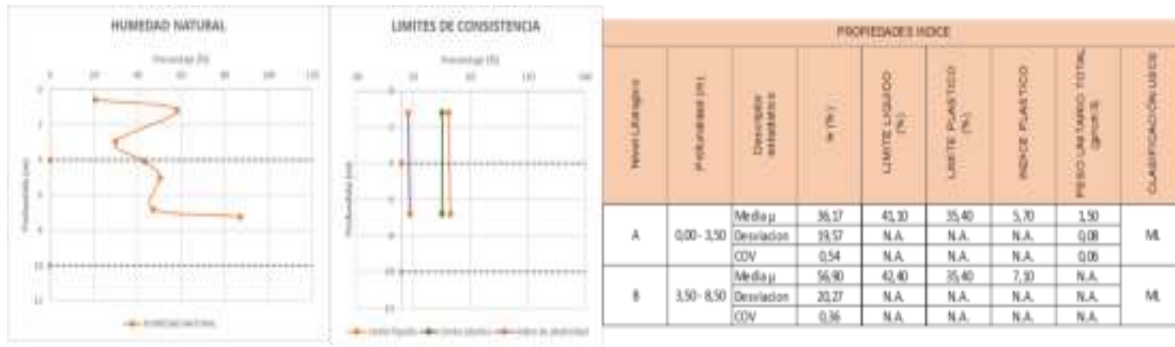


Figura 5.2.35 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-7 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION			PROPIEDADES INDICE										HIDROMETRIA					CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL					COMPRESION INCONFINADA														
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (g/cm³)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	GRAVEDAD ESPECIFICA	(%) DE ARCILLA	(%) DE LIMO	(%) ARCILLA MENOR DE 2 MICRAS	PLASTIFICACION USCS	PESO UNITARIO (TM3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	RELACION DE VACIOS FINAL (e)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	RECOMPRISION Cc	CARGA PRECONSOLIDACION (kg/cm²)	PRECONSOLIDACION (kg/cm²)	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm³)	PESO UNITARIO SECO (g/cm³)	INCONFINADA (g/cm³)	DEFORMACION UNITARIA		
QUI-MON-NA-MS8-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	1	0,5	0,7	0,6	23,8																													
QUI-MON-NA-MS8-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	2	0,9	1,1	1	35,2																													
QUI-MON-NA-MS8-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	3	1,4	1,6	1,5	49,5	48,9	36	12,9																										
QUI-MON-NA-MS8-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	4	2,6	2,8	2,7	46,6																													
QUI-MON-NA-MS8-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	5	3,4	3,6	3,5	38,5																													
QUI-MON-NA-MS8-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	6	4,2	4,3	4,25	46,3																													
QUI-MON-NA-MS8-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	7	6,4	6,6	6,5	53				1,69	2,5	2,6	1,9	22,8	1,9		1,48	2,5	53	38,6	83,9	99,8	1,58	0,57	0,16	2,1	58,92	1,69	1,06	1,01	3,83				
QUI-MON-NA-MS8-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	8	8	7,4	7,6	7,5	46,3	37,8	29,1	8,7																										



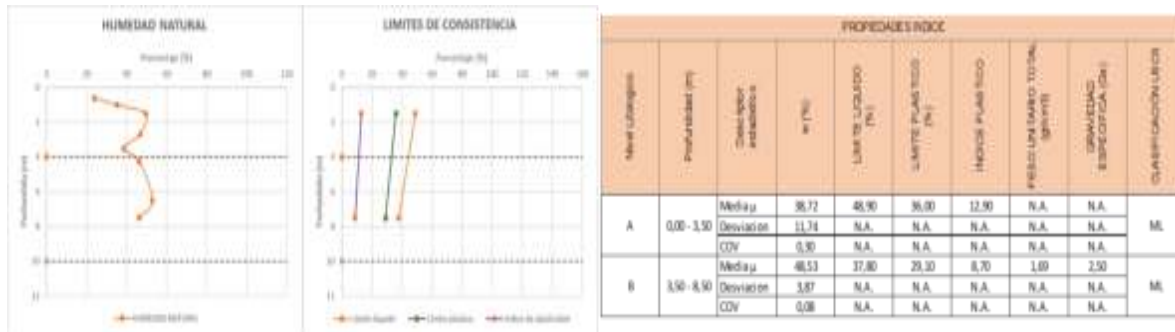


Figura 5.2.36 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-8 (fuente propia)

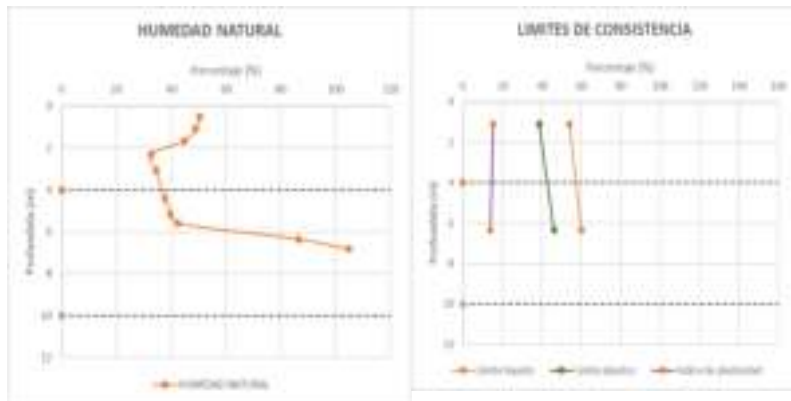
CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE										CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL														
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No.	MUESTRA No.	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE ASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO (Kg/m <sup>3</sup> )	TAMIZ No. 200 QUE PASA (%)	GRAVEDAD ESPECIFICA	% DE ARELLA	% DE LIMO < 0,075 mm	CLASIFICACION UNIFORME	PESO UNITARIO (Kg/m <sup>3</sup> )	ESPECIFICO	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACIONE VACIOS INICIAL	RELACIONE VACIOS FINAL	INDICE PAMIA VIRGEN CC	INDICE PAMIA PEGRIN CC	CARGA PUNTO DE FLEXION (Kg/cm <sup>2</sup> )	
QUI-MON-NA-MS9-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	9	1	1,4	1,8	1,6	41,7																				
QUI-MON-NA-MS9-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	9	2	2,4	2,6	2,5	34,2																				
QUI-MON-NA-MS9-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	9	3	3	3,2	3,1	42,6	43,5	30,8	12,7				49,8	2,6	6,7	29,6	6,7									
QUI-MON-NA-MS9-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	9	4	3,6	3,7	3,65	75,5				1,36	2,55					1,36	2,55	75,5	66,9	83,7	97,4	2,3	0,99	0,01	5,1	

Figura 5.2.37 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-9 (fuente propia)

CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE					RANULOMETRIA MISMA ENTIDAD					ROME			
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No.	MUESTRA No.	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	TAMIZ No. 4 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 10 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 40 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 100 (%) QUE PASA	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS
QUI-MON-NA-MS10-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	1	0,2	0,5	0,35	23,1				100	100	85,2	53,4	39,1	
QUI-MON-NA-MS10-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	2	0,9	1,2	1,05	43,3	52,1	36,6	15,4						MH
QUI-MON-NA-MS10-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	3	2	2,2	2,1	36,4									
QUI-MON-NA-MS10-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	4	2,7	3,25	2,975	33,5	47,5	34	13,5						ML
QUI-MON-NA-MS10-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	5	3,6	4,15	3,875	43,9									
QUI-MON-NA-MS10-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	6	5,2	5,4	5,3	48,7									51,5
QUI-MON-NA-MS10-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	7	6,4	6,6	6,5	42,5									35,1
QUI-MON-NA-MS10-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	8	7,4	7,6	7,5	63,3				100	100	96,3	80,3	70,1	
QUI-MON-NA-MS10-M9	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO	10	9	7,8	7,85	7,825	82,1									



CODIGO INTERNO DE MUESTRA	LOCALIZACION							PROPIEDADES INDICE							RI A M	ROME	CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL											
	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	CLASE DE MUESTRA	PERFORACION No	MUESTRA No	TRAMO DESDE (m)	TRAMO HASTA (m)	PROF MEDIA (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)			GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	TAMIZ No. 200 (%) QUE PASA	CLASIFICACION USCS	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION
QUI-MON-NA-MS13-M1	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	1	0,4	0,6	0,5	50,4																		
QUI-MON-NA-MS13-M2	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	2	1	1,2	1,1	49	54,2	38,8	15,4		2,57		MH											
QUI-MON-NA-MS13-M3	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	3	1,6	1,75	1,675	44,8																		
QUI-MON-NA-MS13-M4	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	4	2,2	2,4	2,3	32,7																		
QUI-MON-NA-MS13-M5	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	5	3	3,15	3,075	34,5																		
QUI-MON-NA-MS13-M6	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	6	4,2	4,6	4,4	37,7					55,4													
QUI-MON-NA-MS13-M7	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	7	5,1	5,25	5,175	39,7																		
QUI-MON-NA-MS13-M8	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	8	5,5	5,7	5,6	42,5																		
QUI-MON-NA-MS13-M9	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	9	6,2	6,5	6,35	86,5	60,1	46,2	13,9				MH											
QUI-MON-NA-MS13-M10	QUINDIO	MONTENEGRO	SONDEO		13	10	6,8	6,85	6,825	104,9				1,13	2,65			1,13	2,65	105	112	72,9	99,8	3,81	1,26	0,11	2,5	



PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litologico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	42,28	54,20	38,80	15,40	N.A.	2,57	MH
		Desviación	8,21	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		COV	0,19	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	62,26	60,10	46,20	13,90	1,13	2,65	MH
		Desviación	31,26	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		COV	0,50	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

Figura 5.2.40 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Montenegro- Quindío- MS-13 (fuente propia)

PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm <sup>3</sup> )	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	42,56	54,56	40,20	14,37	1,57	2,66	ML-MH
		Desviación estandar $\sigma$	18,61	18,11	13,06	7,36	0,16	0,12	
		COV	0,44	0,33	0,32	0,51	0,10	0,05	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	54,04	61,12	43,04	18,09	1,55	2,66	ML-MH
		Desviación estandar $\sigma$	21,29	21,35	11,28	12,85	0,18	0,15	
		COV	0,39	0,35	0,26	0,71	0,12	0,05	
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	52,68	76,83	56,07	20,77	1,61	2,73	MH-OH
		Desviación estandar $\sigma$	24,92	30,10	20,69	12,35	0,14	0,08	
		COV	0,47	0,39	0,37	0,59	0,09	0,03	

CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL												
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	PESO UNITARIO (T/MS)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACION DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRISION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm <sup>2</sup> )
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	1,58	2,55	46,44	39,19	85,46	99,40	1,41	0,46	0,04	1,82
		Desviación estandar $\sigma$	0,17	0,11	14,50	13,17	12,27	0,80	0,47	0,14	0,02	0,97
		COV	0,11	0,04	0,31	0,34	0,14	0,01	0,34	0,30	0,48	0,53
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	1,44	2,58	67,85	60,43	86,07	99,18	2,08	1,05	0,04	2,75
		Desviación estandar $\sigma$	0,16	0,09	19,16	22,01	6,10	1,08	0,75	0,79	0,04	1,40
		COV	0,11	0,03	0,28	0,36	0,07	0,01	0,36	0,75	0,98	0,51
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,37	0,03	3,10
		Desviación estandar $\sigma$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		COV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	COMPRESION INCONFINADA					CORTE DIRECTO		
			HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (g/cm <sup>3</sup> )	qu INCONFINADA (kg/cm <sup>2</sup> )	DEFORMACION UNITARIA	ANGULO DE FRICCION $\phi$ (°)	COHESION (kg/cm <sup>2</sup> )	
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	59,19	1,41	0,90	0,62	2,12	33,43	0,27	
		Desviación estandar $\sigma$	15,49	0,11	0,17	0,24	0,71	5,63	0,05	
		COV	0,26	0,08	0,19	0,38	0,33	0,17	0,17	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	43,12	1,60	1,09	1,03	2,92	24,99	8,67	
		Desviación estandar $\sigma$	8,72	0,09	0,06	0,27	0,67	21,41	13,63	
		COV	0,20	0,06	0,06	0,26	0,23	0,86	1,57	
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	40,54	0,29	
		Desviación estandar $\sigma$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	8,77	0,22	
		COV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,22	0,74	

		COLAPSABILIDAD						GRADO EXPANSIÓN	ACTIVIDAD COLOIDAL	
Nivel Litológico	Profundidad (m)	DENISON	CLASIFICACION	PRIKLOSNIKY	CLASIFICACION	U.R.S.S	CLASIFICACION	RAMAN	SKEMPTON	CLASIFICACION
A	0,00 - 3,50	1,52	Tendencia a Altamente colapsable	0,64	Suelos expansivos con tendencia al no colapso	-0,24	No colapsa	BAJO - MEDIO	0,02	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL
B	3,50 - 8,50	1,79	Tendencia a Altamente colapsable	2,00	Suelos expansivos con tendencia al no colapso	-1,05	No colapsa	MEDIO	0,02	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL
C	Mayor a 8,5 m	1,52	Tendencia a Altamente colapsable	1,02	Suelos expansivos con tendencia al no colapso	-0,33	No colapsa	MEDIO	N.A.	N.A.

*Tabla 5.2.2 Análisis estadístico por nivel litológico información secundaria Quindío- parte 2 (fuente propia)*

**ANEXO 5.2.3**  
**ZONA PILOTO 3**





















SONDEO	LOCALIZACION				PROPIEDADES INDICE										GRANULOMETRÍA	CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL										CORTE DIRECTO		DESCRIPCION					
	TIPO DE INFORMACION	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	MOISTURE NATURAL (%)	LLIQUIDO (%)	PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	UNITARIO	200 (μ) QUE PASA POR CUBIERTA		INDICE UNIFORMIDAD	ESPECIFICO (g/s)	NUMERIDAD LOGAR (g)	NUMERIDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	INDICE DE COMPRESION	INDICE RAMA INDIKETE	RECOMPRESO	PRECONSOLIDACION (kg/cm <sup>2</sup> )	PRECEDENTE	CONEXION (kg/cm <sup>2</sup> )						
ATL-BRR-NA-PSB-M1	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	1	00-1	0,75	42,6	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLA DE COLOR CAFE CON GRS, ALGO OMBADA, EN ESTADO SÓLIDO, EXPANSIVIDAD MUY ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA BLANDA Y HUMEDAD ALTA.
ATL-BRR-NA-PSB-M2	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	2	50-3	2,25	28,6	64,4	20,8	43,6	0	0	CH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLA DE COLOR CAFE CON GRS, ALGO OMBADA, EN ESTADO SÓLIDO, EXPANSIVIDAD MUY ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA BLANDA Y HUMEDAD MEDIA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M3	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	3	00-4	3,75	21,7	0	0	0	0	0	0	2,06	2,8	23,9	22,8	97,5	94	0,69	0,14	0,04	2	22,1	0,51	-	-	-	-	ARCILLA DE COLOR CAFE VERDESO CON BETAS NEGRAS, OMBADA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO, EN ESTADO SÓLIDO, DE CONSISTENCIA MUY FIRME Y HUMEDAD MEDIA - BAJA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M4	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	4	50-6	5,25	21,6	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLA DE COLOR CAFE VERDESO CON BETAS NEGRAS, OMBADA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO, EN ESTADO SÓLIDO, DE CONSISTENCIA MUY FIRME Y HUMEDAD MEDIA - BAJA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M5	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	5	00-7	6,75	34,7	70,5	36,6	33,8	0	0	MH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LIMO ARCILLOSO DE COLOR GRS VERDESO A OSCURO, ALGO OMBADA, EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD MUY ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - ALTA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M6	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	6	50-9	8,25	30,1	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLONITA DE COLOR GRS OSCURO EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M7	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	7	0-10	9,75	21,8	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLONITA DE COLOR GRS OSCURO EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - BAJA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M8	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	8	50-12	11,3	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLONITA DE COLOR GRS OSCURO EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - BAJA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M9	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	9	00-13	12,8	15,6	53,3	22,2	31,1	0	0	CH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLONITA DE COLOR GRS OSCURO CON ALGO DE GRAVAS, EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - BAJA.	
ATL-BRR-NA-PSB-M10	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUIL	SONDEO	58	10	50-15	14,3	16	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ARCILLONITA DE COLOR GRS OSCURO EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - BAJA.	



Figura 5.2.51 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Barranquilla P-58. (fuente propia)



SONDEO	TIPO DE INFORMACION	LOCALIZACION				PERFORACION No	MUESTRA No	PROFUNDIDAD (ft)	PROFUNDIDAD MEDIA HUMEDAD NATURAL	PROPIEDADES INDICE					GRANULOMETRÍA			DESCRIPCION
		DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION	TIPO DE EXPLORACION					W	LMITE LIQUIDO (%)	LMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO	TOTAL	TAMIZ No. 200 (%)	QUE PASA POR EL TAMIZ No. 75 (%)	
ATL-BRR-NA-P59-M1	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	1	00 - 15	0,75	33,9	0	0	0	1,94	0	0		ARCILLA DE COLOR CAFÉ CON GRIS, ALGO OXIDADA, EN ESTADO PLÁSTICO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA BLANDA Y HUMEDAD MEDIA - ALTA.	
ATL-BRR-NA-P59-M2	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	2	50 - 3,4	2,25	35,2	51,7	18,6	33	0	0	CH	ARCILLA DE COLOR CAFÉ CON GRIS, ALGO OXIDADA, EN ESTADO PLÁSTICO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA BLANDA Y HUMEDAD MEDIA - ALTA.		
ATL-BRR-NA-P59-M3	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	3	00 - 4,5	3,75	25,7	0	0	0	2,04	0	0	ARCILLA DE COLOR CAFÉ CON GRIS, CON ALGO DE GRAVAS, ALGO OXIDADA, EN ESTADO PLÁSTICO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA BLANDA Y HUMEDAD MEDIA.		
ATL-BRR-NA-P59-M4	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	4	50 - 6,4	5,25	31,4	66,8	41,5	25,3	0	0	MH	LIMOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, FRACTURADA, EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD MEDIA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - ALTA.		
ATL-BRR-NA-P59-M4A	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	4A	50 - 6,4	5,25	25,2	0	0	0	0	0	0	LIMOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, FRACTURADA, EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD MEDIA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - ALTA.		
ATL-BRR-NA-P59-M5	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	5	00 - 7,5	6,75	36,2	62,9	31,7	31,2	0	0	MH	LIMO ARCILLOSO DE COLOR GRIS OSCURO, FRACTURADA, EN ESTADO SÓLIDO, DE EXPANSIVIDAD ALTA, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - ALTA.		
ATL-BRR-NA-P59-M6	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	6	50 - 9,4	8,25	24,3	0	0	0	0	0	0	ARCILLOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, FRACTURADA, EN ESTADO SÓLIDO, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - BAJA. REACCIONA AL HCL.		
ATL-BRR-NA-P59-M7	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	59	7	00 - 10,	9,75	20,5	0	0	0	0	0	0	ARCILLOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, FRACTURADA, EN ESTADO SÓLIDO, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA - BAJA. REACCIONA AL HCL.		

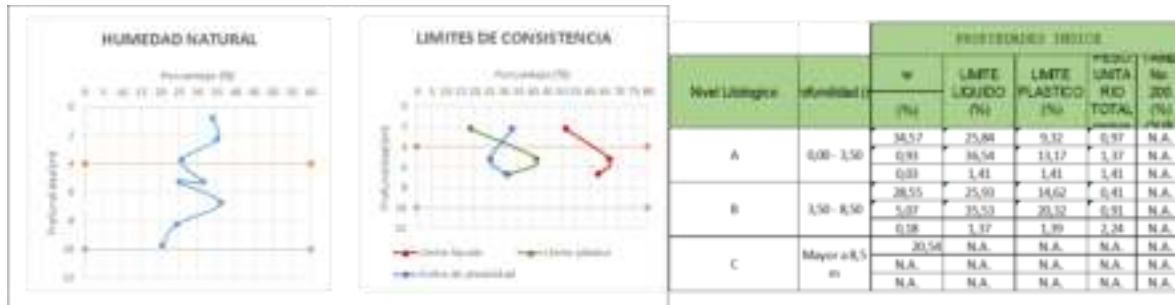


Figura 5.2.52 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Barranquilla P-59. (fuente propia)





SONDEO	LOCALIZACIÓN				TIPO DE EXPLORACION	PERFORACION No	MUESTRA No	PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA	HUMEDAD NATURAL (%)	PROPIEDADES INDICE				GRANULOMETRÍA		COMPRESIÓN INCONFINADA				DESCRIPCIÓN				
	TIPO DE INFORMACION	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TIPO DE EXPLORACION							LÍMITE LIQUIDO (%)	LÍMITE PLASTICO (%)	ÍNDICE PLASTICO	PESO UNITARIO	TAM. PASA 200 (µ)	PASA 425 (µ)	USC.	HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm³)	PESO UNITARIO (kg/m³)		INCONFINADA (kg/cm²)	DEFORMACION UNITARIA		
ATL-BRR-NA-P55-M1	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	1	0,00 - 1,50	0,75	53,5	94,9	34,6	60,4	0	0	CH	0	0	0	0	0	0	0	ARCILLA DE COLOR HABANO CON BETAS OXIDADAS, EN ESTADO PLASTICO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MUY ALTO, DE PLASTICIDAD MUY ALTA Y HUMEDAD ALTA.		
ATL-BRR-NA-P55-M2	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	2	1,50 - 3,00	2,25	42	0	0	0	0	1,79	0	0	0	0	0	0	0	0	ARCILLA DE COLOR AMARILLO CON ALGO DE ARENA FINA A MEDIA (BUELENO) Y DE HUMEDAD ALTA.		
ATL-BRR-NA-P55-M3	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	3	3,00 - 4,50	3,75	45,2	0	0	0	0	0	99,4	0	0	0	0	0	0	0	0	ARCILLA DE COLOR GRIS JUNTO CON ARENA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO Y DE HUMEDAD ALTA.	
ATL-BRR-NA-P55-M4	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	4	4,50 - 6,00	5,25	39,4	79	39,5	39,5	0	0	MH	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMO DE COLOR GRIS VERDOSO JUNTO CON ARENA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MUY ALTO, DE PLASTICIDAD MUY ALTA Y DE HUMEDAD ALTA.	
ATL-BRR-NA-P55-M5	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	5	5,00 - 7,50	6,75	38,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMO DE COLOR GRIS VERDOSO JUNTO CON ARENA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MUY ALTO, DE PLASTICIDAD MUY ALTA Y DE HUMEDAD ALTA.	
ATL-BRR-NA-P55-M6	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	6	7,50 - 9,00	8,25	39,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMO DE COLOR GRIS VERDOSO JUNTO CON ARENA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MUY ALTO, DE PLASTICIDAD MUY ALTA Y DE HUMEDAD ALTA.	
ATL-BRR-NA-P55-M7	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	7	9,00 - 10,50	9,75	44,1	85,5	37,1	48,4	0	0	MH	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMO DE COLOR GRIS VERDOSO JUNTO CON ARENA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MUY ALTO, DE PLASTICIDAD MUY ALTA Y DE HUMEDAD ALTA.	
ATL-BRR-NA-P55-M8	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	8	10,50 - 12,00	11,3	40,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMO DE COLOR GRIS VERDOSO JUNTO CON ARENA, PRESENCIA DE MATERIAL CRISTALINO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MUY ALTO, DE PLASTICIDAD MUY ALTA Y DE HUMEDAD ALTA.	
ATL-BRR-NA-P55-M9	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	9	12,00 - 13,50	12,8	27,9	0	0	0	1,96	0	0	27,9	1,94	0	13,1	4,63	0	0	0	LIMOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MEDIO, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA.	
ATL-BRR-NA-P55-M10	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	10	13,50 - 15,00	14,3	26,8	63,9	40,5	23,4	1,84	0	MH	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MEDIO, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA.	
ATL-BRR-NA-P55-M11	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	11	15,00 - 16,50	15,8	27,9	0	0	0	1,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MEDIO, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA.
ATL-BRR-NA-P55-M12	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	12	16,50 - 18,00	17,3	14,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MEDIO, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA.
ATL-BRR-NA-P55-M13	NATIVA	ATLANTICO	ARRANQUILL	SONDEO	55	13	18,00 - 19,50	18,8	27,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	LIMOLITA DE COLOR GRIS OSCURO, EN ESTADO SÓLIDO, DE POTENCIAL EXPANSIVO MEDIO, DE PLASTICIDAD ALTA, DE CONSISTENCIA DURA Y DE HUMEDAD MEDIA.

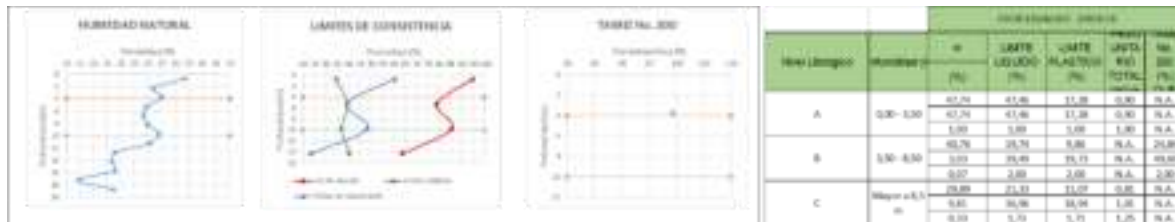


Figura 5.2.55 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Barranquilla P-55. (fuente propia)



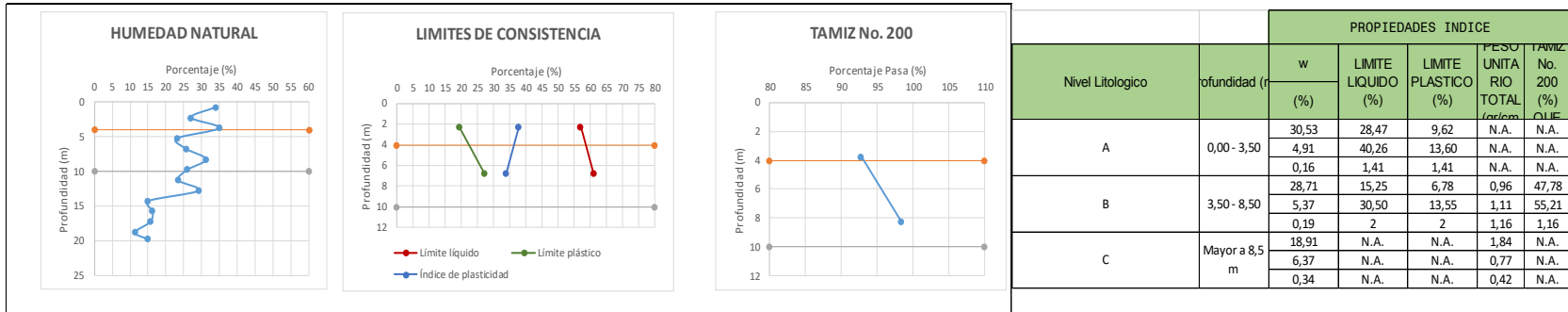


Figura 5.2.56 Resultados de ensayos de laboratorio municipio de Barranquilla P-57. (fuente propia)

PROPIEDADES INDICE									
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	w (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	PESO UNITARIO TOTAL (gr/cm3)	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)	CLASIFICACIÓN USCS
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	40,79	64,82	25,31	39,48	N.A.	1,87	CH
		Desviación estándar $\sigma$	11,43	18,51	6,48	12,84	N.A.	0,11	
		COV	0,28	0,29	0,26	0,33	N.A.	0,06	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	33,60	71,89	31,53	40,37	1,83	2,03	CH
		Desviación estándar $\sigma$	9,41	15,02	5,55	15,05	0,14	0,16	
		COV	0,28	0,21	0,18	0,37	0,08	0,08	
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	24,26	56,89	29,92	26,97	1,95	2,04	CH
		Desviación estándar $\sigma$	8,63	13,96	7,39	9,92	0,19	0,17	
		COV	0,36	0,25	0,25	0,37	0,10	0,08	

CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL												
Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	PESO UNITARIO (T/M3)	PESO ESPECIFICO (GS)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	SATURACION INICIAL (%)	SATURACION FINAL (%)	RELACIÓN DE VACIOS INICIAL (e0)	INDICE RAMA VIRGEN Cc	INDICE DE RECOMPRESION Cr	CARGA PRECONSOLIDACION (Kg/cm2)
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		Desviación estándar $\sigma$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		COV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	1,83	3,14	35,37	33,64	84,61	87,42	1,35	0,25	0,06	1,96
		Desviación estándar $\sigma$	0,14	0,46	8,50	11,29	7,98	20,70	0,50	0,13	0,03	0,50
		COV	0,08	0,15	0,24	0,34	0,09	0,24	0,37	0,53	0,51	0,25
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	1,95	3,07	27,28	28,99	82,52	96,11	1,02	0,18	0,25	2,32
		Desviación estándar $\sigma$	0,19	0,31	10,78	10,90	9,56	3,32	0,57	0,16	0,79	0,65
		COV	0,10	0,10	0,40	0,38	0,12	0,03	0,56	0,89	3,23	0,28

Nivel Litológico	Profundidad (m)	Descriptor estadístico	COMPRESION INCONFINADA					CORTE DIRECTO		
			HUMEDAD (%)	PESO UNITARIO (g/cm3)	PESO UNITARIO SECO (g/cm3)	qu INCONFINADA (kg/cm2)	DEFORMACION UNITARIA	ANGULO DE FRICCION $\phi$ (°)	COHESION (kg/cm2)	
A	0,00 - 3,50	Media $\mu$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		Desviación estándar $\sigma$	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		COV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
B	3,50 - 8,50	Media $\mu$	29,43	1,92	N.A.	1,10	1,98	28,51	0,38	
		Desviación estándar $\sigma$	5,93	0,14	N.A.	1,61	1,35	9,77	0,96	
		COV	0,20	0,07	N.A.	1,46	0,68	0,34	2,51	
C	Mayor a 8,5 m	Media $\mu$	19,98	2,11	N.A.	8,16	3,63	24,60	1,60	
		Desviación estándar $\sigma$	5,25	0,15	N.A.	6,15	1,30	14,61	1,63	
		COV	0,26	0,07	N.A.	0,75	0,36	0,59	1,02	

Tabla 5.2.3 Análisis estadístico por nivel litológico información secundaria Barranquilla- parte 1 (fuente propia)

Nivel Litológico	Profundidad (m)	COLAPSABILIDAD						GRADO EXPANSIÓN		ACTIVIDAD COLOIDAL	
		DENISON	CLASIFICACIÓN	PRIKLOSKIN	CLASIFICACIÓN	U.R.S.S	CLASIFICACIÓN	RAMAN	SKEMPTON	CLASIFICACIÓN	
A	0,00 - 3,50	N.A.	N.A.	0,39	Suelos no colapsables con tendencia a	N.A.	N.A.	ALTO - MUY ALTO	0,04	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON	
B	3,50 - 8,50	1,37	Suelo no colapsable	0,06	Tendencia a no colapsar	-0,22	No colapsa	ALTO - MUY ALTO	0,16	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE	
C	Mayor a 8,5 m	2,22	Suelo no colapsable	-0,23	Suelos expansivos con tendencia al no colapsar	-0,46	No colapsa	MEDIO - ALTO	0,13	CAOLINITA, CLASIFICADA COMO INACTIVA Y CON POTENCIAL DE	

*Tabla 5.2.4 Análisis estadístico por nivel litológico información secundaria Barranquilla- parte 2 (fuente propia)*



## **ANEXO 5.3**

# **MATRIZ CONSOLIDADA ENSAYOS DE LABORATORIO RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN INFORMACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA PARA LAS TRES ZONAS PILOTO**

Tabla 5.3.1  
Parámetros ensayo de compresión simple para las tres zonas piloto

Sondeo	Muestra	Profund (m)			Humed %	Peso Unitario		Resist a la comp.		Cui kPa	E kPa
		de	a	prom		gr/cm3	kN/m3	Kg/cm <sup>2</sup>	kPa		
TAB1	4	2.6	3.1	2.85	28.82	1.96	19.6	0.617	61.7	30.9	40000
TAB1	5	3.1	3.6	3.35	32.99	1.8465	18.465	0.2277	22.8	11.4	71200
TAB1	6	4.1	4.7	4.4	29.35	1.797	17.97	0.542	54.2	27.1	27778
TAB1	7	4.7	5.2	4.95	32.21	1.58	15.8	0.3027	30.3	15.1	30263
TAB1	8	7.2	7.8	7.5	71.06	1.958	19.58	0.1271	12.7	6.4	49000
TAB1	9	7.8	8.5	8.15	38.58	1.84	18.4	0.83	83.0	41.5	66250
TAB1	10	11	11.6	11.3	19.48	1.93	19.3	0.5086	50.9	25.4	62703
TB3	1	0.00	0.60	0.3	8.475	1.77	17.7	0.4685	46.9	23.4	24167
TB3	2	0.60	1.20	0.9	8.475	1.976	19.76	1.029	102.9	51.5	47500
TB3	3	1.20	1.80	1.5	8.475	1.532	15.32	0.6191	61.9	31.0	50000
TB3	4	1.80	2.40	2.1	8.475	1.68	16.8	0.8009	80.1	40.0	43750
TB3	6	5.20	5.80	5.5	8.475	1.707	17.07	0.5052	50.5	25.3	17722
TB3	7	7.00	7.60	7.3	8.475	1.417	14.17	0.362	36.2	18.1	30000
TB3	8	10.40	11.00	10.7	8.475	1.561	15.61	0.8967	89.7	44.8	37500
MN1	1				8.475	1.88	18.8	0.905	90.5	45.3	42667
MN1	2				8.475	1.769	17.69	0.368	36.8	18.4	43333
MN1	3				8.475	1.886	18.86	0.375	37.5	18.8	70000
MN1	4				8.475	1.528	15.28	0.3456	34.6	17.3	58000
MN1	7				8.475	1.68	16.8	0.8539	85.4	42.7	34783
MN1	8				8.475	1.798	17.98	0.7274	72.7	36.4	43333
MS1	4				74.09	1.3	13	0.65	65.0	32.5	21951
MS5	3	2.3	2.6	2.45	66.41	1.35	13.5	0.35	35.0	17.5	35000
MS6	3	2	2.15	2.075	38.1	1.56	15.6	0.92	92.0	46.0	24400
MS6	6	4.2	4.35	4.275	38.1	1.63	16.3	0.71	71.0	35.5	53333
MS6	8	7	7.2	7.1	53.19	1.6	16	1.36	136.0	68.0	21667
MS7	2	1.1	1.3	1.2	58.14	1.44	14.4	0.56	56.0	28.0	22727
MS8	7	6.4	6.6	6.5	58.92	1.69	16.9	1.01	101.0	50.5	30000
MS12	8	6.6	6.7	6.65	38.07	1.48	14.8	1.04	104.0	52.0	24545
P46	3	3	4.5	3.75	29.03	1.88	18.8	0.93	93.0	46.5	22857
P47	7	9	10.5	9.75	17.81	2.08	20.8	1.58	158.0	79.0	13333
P46	10	13.5	15	14.25	17.42	2.14	21.4	8.69	869.0	434.5	28125
P54	11	15	16.5	15.75	12.76	2.22	22.2	16.88	1688.0	844.0	31481
P55	9	12	13.5	12.75	27.85	1.94	19.4	13.05	1305.0	652.5	26667
P56	8	13.5	15	14.25	16.37	2.13	21.3	4.57	457.0	228.5	51429
P57	8	10.5	12	11.25	23.42	1.91	19.1	11.17	1117.0	558.5	85714
P57	9	12	13.5	12.75	29.11	1.73	17.3	0.93	93.0	46.5	26667
P57	10	13.5	15	14.25	14.9	2.39	23.9	8.49	849.0	424.5	30000
P47	11	15	16.5	15.75	23.45	2.08	20.8	2.19	219.0	109.5	55000
P53	10	16.5	18	17.25	23.23	2.06	20.6	17.45	1745.0	872.5	42105
S1	1	1.14	1.4	1.27	88.33	1.31	13.1	0.45	45.0	22.5	47778
P57	11	15	16.5	15.75	16.24	2.16	21.6	5.03	503.0	251.5	65000
P57	12	16.5	18	17.25	15.51	2.29	22.9	1.46	146.0	73.0	25000
P57	14	19.5	20	19.75	14.89	2.14	21.4	18.17	1817.0	908.5	21273
P54	6	7.5	9	8.25	23.4	2.05	20.5	3.92	392.0	196.0	24000

Tabla 5.3.2  
Parámetros consolidaciones zona piloto 1

LOC		sondeo	muestra	PROFUNDIDAD (m)			Humedad Natural (%)	Peso Unitario g/cm3	Peso Unitario kN/m3	GS	Relación de vacíos $e_o$	Cc	Cr	$\sigma_{vo}'$ lab kPa	$\sigma_{vp}'$ lab kPa	Curva CN		
				de	a	prom										$\sigma_{REF}$ kPa	$e_{REF}$	
	1																	
	2																	
SABANA	3	S2	3	1.2	1.5	1.35	8.08	1.91	19.10	2.66	0.721	0.120	0.030	12.285		100	0.680	
	4																	
	5	S2	5	4	4.5	4.25	22.95	1.98	19.80	2.66	0.869	0.165	0.024	41.65		100	0.880	
	6																	
	7	S2	7	7	8.5	7.75	14.33	2.06	20.60	2.66	0.767	0.130	0.030	82.15		100	0.750	
	8																	
	9	S2	9	10	11.5	10.75	34.2	1.78	17.80	2.66	1.092	0.190	0.045	83.85		100	1.090	
	10	S2	10	4	4.5	4.25	8.71	1.79	17.90	2.66	0.915	0.085	0.015	33.575		100	0.935	
	11																	
	12																	
	13																	
	14	TAB1	3	3.9	4.5	4.2	17.2	1.87	18.69	2.59	0.621	0.197	0.004	36.5069		100	0.715	
	15	TAB1	4	2.6	3.1	2.85	25	2.02	20.23	2.68	0.718	0.270	0.040	29.1527		100	0.735	
	16																	
	17	TAB1	6	4.1	4.7	4.4	28.4	1.99	19.93	2.61	0.689	0.285	0.032	43.7089		100	0.690	
	18	TABIO 1	7	4.7	5.2	4.95	29.31	2.90	29.00	2.67	0.963	0.230	0.030	94.039		100	0.830	
	19	TABIO 1	8	7.2	7.8	7.5	29.31	2.68	26.80	2.68	0.906	0.260	0.030	125.979		100	0.760	
20																		
50	TB3	7	10.4	11	10.7	55.3	1.64	16.36	2.72	1.589	0.143	0.028	68.0457		100	1.532		

Tabla 5.2.3

Parámetros consolidaciones zona piloto 1-método francés

METODO FRANCES											
$e_{LL}$	$e_{LP}$	$w_{LL}$	$w_{LP}$	$IP_{NC}$	$w_{sat}$	$\gamma_{NC}$ kPa	$\sigma_{p'}$ kPa	$e_{p'}$	OCR	Kc	Cc
0.822	0.560	30.9	21.1	9.9	27.1	19.65	70.5	0.698	5.74	82.22	0.120
1.076	0.715	40.4	26.9	13.6	32.7	18.88	138.9	0.856	3.34	82.22	0.165
0.904	0.620	34.0	23.3	10.7	28.8	19.39	71.7	0.769	0.87	82.22	0.130
1.316	0.900	49.5	33.8	15.6	41.1	17.93	102.3	1.088	1.22	82.22	0.190
1.036	0.850	38.9	32.0	7.0	34.4	18.67	243.9	0.902	7.27	82.22	0.085
0.949	0.518	36.6	20.0	16.6	24.0	19.81	313.4	0.617	8.59	84.44	0.197
1.056	0.465	39.4	17.4	22.0	26.8	19.78	146.9	0.690	5.04	81.61	0.270
1.028	0.405	39.4	15.5	23.9	26.4	19.53	112.1	0.676	2.56	83.80	0.285
1.103	0.600	41.3	22.5	18.8	36.1	18.51	21.8	0.982	0.23	81.91	0.230
1.069	0.500	39.9	18.7	21.2	33.8	18.81	22.5	0.928	0.18	81.61	0.260
1.702	1.389	62.6	51.1	11.5	58.4	16.64	35.1	1.597	0.52	80.41	0.143

Tabla 5.2.4

Parámetros consolidaciones zona piloto 2

LOC	sondeo	muestra	PROFUNDIDAD (m)			Humedad Natural (%)	Peso Unitario g/cm3	Peso Unitario kN/m3	GS	Relación de vacíos e <sub>o</sub>	Cc	Cr	σ <sub>vo</sub> ' lab kPa	σ <sub>v<sub>p</sub>'</sub> lab kPa	Curva CN		
			de	a	prom										σ <sub>REF</sub> kPa	e <sub>REF</sub>	
	1																
QUINDIO	52	TB3	8	13	13.6	13.3	50.7	1.90	19.01	2.70	1.138	0.206	0.030	119.83	100	1.160	
	53																
	54																
	55																
	56	MN1	4	4.4	5	4.7	63	1.94	19.44	2.73	1.290	0.206	0.004	44.363	100	1.229	
	57	MN1	5	6.2	6.8	6.5	57.6	1.84	18.41	2.69	1.286	0.133	0.022	54.669	100	1.235	
	58	MN1	6	9	9.6	9.3	51.1	1.44	14.40	2.69	2.918	1.145	0.040	40.9291	100	3.270	
	59																
	60	MN1	8	13.4	14	13.7	57	1.84	18.41	2.74	1.343	0.161	0.008	115.274	100	1.309	
	61																
	62	MS1	6	4.2	4.3	4.25	70.5	1.39	13.90	2.60	2.183	1.030	0.074	16.575	100	2.202	
	63	MS2	3	1.5	1.65	1.575	58.2	1.51	15.10	2.65	1.772	0.570	0.042	8.0325	100	1.930	
	64	MS3	5	3.5	3.6	3.55	77.9	1.37	13.70	2.59	2.367	0.440	0.059	13.135	100	2.270	
	65	MS3	8	7.4	7.6	7.5	63.5	1.43	14.30	2.63	2.017	0.920	0.045	32.25	1000	1.350	
	66																
	67	MS5	7	5.6	5.68	5.64	73.9	1.37	13.70	2.60	2.296	1.030	0.032	20.868	100	2.404	
	68																
	69																
	70																
	71	MS6	8	7	7.2	7.1	52.8	1.54	15.40	2.63	1.602	0.340	0.061	38.34	100	1.580	
	72																
	73	MS7	3	2.9	3.1	3	29.9	1.56	15.60	2.59	1.150	0.330	0.050	16.8	100	1.080	
	74	MS8	7	6.4	6.6	6.5	53	1.48	14.80	2.50	1.578	0.570	0.160	31.2	100	1.520	
	75	MS9	4	3.6	3.7	3.65	75.5	1.36	13.60	2.55	2.300	0.990	0.008	13.14	1000	1.902	
	76																
	77																
	78	MS13	10	6.8	6.85	6.825	104.9	1.13	11.30	2.65	3.812	1.260	0.109	8.8725	1000	2.670	
79	T2	3	2.65	2.8	2.725	40.9	1.71	17.10	2.60	1.143	0.340	0.011	19.3475	1000	0.860		
80																	
81	T3	6	6.7	7.3	7	44.6	1.71	17.10	2.65	1.236	0.240	0.020	49.7	100	1.160		
82	T5A	8	5	5.2	5.1	48	1.64	16.40	2.55	1.304	0.280	0.014	32.64	1000	1.110		
83																	
84	T9	4	7.8	8.05	7.925	96.7	1.34	13.40	2.66	2.894	0.830	0.020	26.945	1000	2.250		
85	P45	4	4.5	6	5.25	45.27	1.64	16.40	2.80	1.477	0.380	0.086	3.370	150.0	1.075		

Tabla 5.3.5  
Parámetros consolidaciones zona piloto 2- método francés

METODO FRANCES											
$e_{LL}$	$e_{LP}$	$w_{LL}$	$w_{LP}$	$IP_{NC}$	$w_{sat}$	$\gamma_{NC}$ kPa	$\sigma_{p'}$ kPa	$e_{p'}$	OCR	Kc	Cc
1.405	0.954	52.0	35.3	16.7	42.1	17.95	129.3	1.137	1.08	81.00	0.206
1.474	1.023	54.0	37.5	16.5	47.3	17.55	50.7	1.290	1.14	80.11	0.206
1.393	1.102	51.8	41.0	10.8	47.8	17.39	39.1	1.289	0.72	81.30	0.133
4.629	2.125	172.1	79.0	93.1	108.5	14.31	215.1	2.889	5.25	81.30	1.145
1.500	1.148	54.7	41.9	12.9	49.0	17.43	59.5	1.345	0.52	79.82	0.161
3.425	1.172	131.7	45.1	86.6	84.0	15.03	120.3	2.119	7.26	84.12	1.030
2.607	1.360	98.4	51.3	47.0	66.9	15.95	243.4	1.710	30.30	82.53	0.570
2.792	1.830	107.8	70.7	37.2	91.4	14.72	76.2	2.322	5.80	84.44	0.440
3.362	1.350	127.8	51.3	76.5	76.7	15.40	206.3	1.981	6.40	83.16	0.920
3.627	1.374	139.5	52.8	86.6	88.3	14.85	134.9	2.270	6.46	84.12	1.030
1.984	1.240	75.4	47.1	28.3	60.9	16.26	102.8	1.576	2.68	83.16	0.340
1.472	0.750	56.8	29.0	27.9	44.4	17.40	77.3	1.117	4.60	84.44	0.330
2.197	0.950	87.9	38.0	49.9	63.1	15.82	113.7	1.488	3.65	87.48	0.570
4.067	1.902	159.5	74.6	84.9	90.2	14.70	407.4	2.288	31.01	85.77	0.990
5.426	2.670	204.7	100.8	104.0	143.8	13.43	159.3	3.675	17.95	82.53	1.260
1.604	0.860	61.7	33.1	28.6	44.0	17.47	157.4	1.133	8.14	84.12	0.340
1.445	0.920	54.5	34.7	19.8	46.6	17.38	48.1	1.236	0.97	82.53	0.240
1.722	1.110	67.5	43.5	24.0	51.1	16.73	223.3	1.292	6.84	85.77	0.280
4.065	2.250	152.8	84.6	68.2	108.8	14.26	175.3	2.878	6.50	82.22	0.830
1.906	1.075	68.1	38.4	29.7	52.8	17.27	226.9	1.320	67.33	78.11	0.380



Tabla 5.3.7  
Parámetros consolidaciones zona piloto 3- método francés

METODO FRANCES											
$e_{LL}$	$e_{LP}$	$w_{LL}$	$w_{LP}$	$IP_{NC}$	$w_{sat}$	$\gamma_{NC}$ kPa	$\sigma_{p'}$ kPa	$e_{p'}$	OCR	Kc	Cc
1.083	0.659	36.1	22.0	14.1	28.9	20.71	290.1	0.763	55.69	72.90	0.194
0.879	0.579	31.4	20.7	10.7	24.5	20.68	693.9	0.601	175.22	78.11	0.137
0.912	0.647	30.4	21.6	8.8	24.9	21.44	309.8	0.709	28.85	72.90	0.121
2.553	1.700	69.0	45.9	23.1	56.4	18.74	146.4	2.025	28.42	59.11	0.390
1.284	0.807	45.4	28.5	16.8	35.1	19.19	442.8	0.884	54.94	77.28	0.218
1.799	1.075	56.2	33.6	22.6	42.3	19.35	279.0	1.259	50.73	68.35	0.331
2.828	1.660	76.4	44.9	31.6	56.3	18.76	185.6	2.051	23.35	59.11	0.534
0.784	0.690	30.2	26.5	3.6	27.9	19.28	370.8	0.709	23.59	84.12	0.043
1.939	1.075	55.4	30.7	24.7	42.9	19.99	198.1	1.353	27.86	62.49	0.395
0.968	0.655	30.2	20.5	9.8	26.2	21.97	110.4	0.792	9.16	68.35	0.143
1.795	1.528	51.3	43.7	7.6	47.2	19.43	157.5	1.626	17.92	62.49	0.122
2.092	1.130	65.4	35.3	30.1	51.8	18.28	103.8	1.563	14.46	68.35	0.440
0.697	0.513	22.5	16.5	5.9	19.1	23.19	233.7	0.566	17.23	70.55	0.084
1.096	0.958	38.9	34.0	4.9	35.1	19.15	756.8	0.966	46.75	77.56	0.063
2.172	1.330	67.9	41.6	26.3	52.6	18.20	240.0	1.569	30.57	68.35	0.385
1.584	1.295	49.8	40.7	9.1	43.5	19.15	485.6	1.336	40.40	68.78	0.132
1.013	0.676	32.7	21.8	10.9	25.9	21.65	325.6	0.751	17.49	70.55	0.154
0.719	0.376	27.4	14.3	13.1	21.5	20.42	56.9	0.571	0.37	83.16	0.157



Tabla 5.3.8  
Parámetros cortes zona piloto 1

SONDEO	MUESTRA	GRAVEDAD ESPECIFICA Gs	HUMEDAD NATURAL %	PESO UNITARIO kN/m3	Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia NC	
					$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma$ kPa	$\tau$ kPa	$\sigma$ kPa	$\tau$ kPa	ce kPa	$\phi_e$ kPa	c <sub>RES</sub> kPa	$\phi_{RES}$ kPa	c <sub>NC</sub> kPa	$\phi_{NC}$ kPa
TAB1	M4	2.59	31	19.5	0.2	0.18	0.2	0.15	20	18	20	15	2	40.7	4	34.3	0	35.5
					0.4	0.37	0.4	0.34	40	37	40	34						
					0.8	0.7	0.8	0.57	80	70	80	57						
TAB1	M6	2.59	30	18.1	0.2	0.26	0.2	0.21	20	26	20	21	17	29.4	8	27.5	0	32.5
					0.4	0.43	0.4	0.25	40	43	40	25						
					0.8	0.61	0.8	0.51	80	61	80	51						
S2	M4	2.6	55	17.2	0.28	0.45	0.28	0.28	28	45	28	28	37	13.8	14	24.4	0	32.7
					0.54	0.48	0.54	0.37	54	48	54	37						
					0.81	0.58	0.81	0.52	81	58	81	52						
S2	M9	2.6	55	17.2	0.28	0.39	0.28	0.219	28	39	28	21.9	36	0.0	22	0.0	0	12.5
					0.54	0.35	0.54	0.256	54	35	54	25.6						
					0.81	0.35	0.81	0.18	81	35	81	18						
S2	M10	2.6	55	17.2	0.28	0.78	0.28	0.321	28	78	28	32.1	64	20.8	28	7.1	0	25.5
					0.54	0.79	0.54	0.324	54	79	54	32.4						
					0.81	0.98	0.81	0.387	81	98	81	38.7						

Tabla 5.3.9

Parámetros cortes zona piloto 2

LOCAL	GRAVEDAD ESPECIFICA Gs	HUMEDAD NATURAL %	PESO UNITARIO kN/m <sup>3</sup>	Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia NC	
				σ kg/cm <sup>2</sup>	τ kg/cm <sup>2</sup>	σ kg/cm <sup>2</sup>	τ kg/cm <sup>2</sup>	σ kPa	τ kPa	σ kPa	τ kPa	ce kPa	φ <sub>e</sub> kPa	c <sub>RES</sub> kPa	φ <sub>RES</sub> kPa	c <sub>NC</sub> kPa	φ <sub>NC</sub> kPa
QUINDIO	2.74	34.44	15.2	0.2	0.3	0.2	0.24	20	30	20	24	14	40.7	9	40.4	0	43.5
				0.4	0.49	0.4	0.46	40	49	40	46						
				0.8	0.82	0.8	0.76	80	82	80	76						
QUINDIO	2.72	50.24	15.4	0.2	0.34	0.2	0.2	20	34	20	20	10	46.2	9	31.4	0	35.5
				0.4	0.47	0.4	0.34	40	47	40	34						
				0.8	0.95	0.8	0.57	80	95	80	57						
QUINDIO	2.75	59.15	16.0	0.2	0.34	0.2	0.26	20	34	20	26	29	16.5	21	12.5	0	26.0
				0.4	0.41	0.4	0.29	40	41	40	29						
				0.8	0.52	0.8	0.39	80	52	80	39						
QUINDIO	2.67	48.07	16.3	0.2	0.42			20	42			28	35.5				
				0.4	0.57			40	57								
				0.8	0.85			80	85								
QUINDIO	2.72	57.25	16.0	0.2	0.27	0.2	0.17	20	27	20	17	0	46.9	1	38.1	0	38.7
				0.4	0.33	0.2	0.24	40	33								
				0.8	0.88	0.8	0.64	80	88	80	64						
QUINDIO	2.69	47.78	17.2	0.2	0.55			20	55			45	38.3	52	35.0	0	53.5
				0.4	0.84	0.4	0.8	40	84	40	80						
				0.8	1.05	0.8	1.08	80	105	80	108						
QUINDIO	2.72	61.4	16.3	0.2	0.27	0.2	0.26	20	27	20	26	18	30.2	12	29.7	0	36.4
				0.4	0.44	0.4	0.31	40	44	40	31						
				0.8	0.63	0.8	0.59	80	63	80	59						
QUINDIO	2.72	54.79	16.4	0.2	0.94	0	0.68	20	94	0	68	76	43.7	59	39.5	0	59.2
				0.4	1.16	0.4	0.75	40	116	40	75						
				0.8	1.52	0.8	1.34	80	152	80	134						
QUINDIO	2.74	60.32	15.8	0.2	0.34	0.2	0.19	20	34	20	19	25	29.0	8	29.6	0	33.5
				0.4	0.49	0.4	0.3	40	49	40	30						
				0.8	0.68	0.8	0.53	80	68	80	53						
QUINDIO	2.14	50.05	15.7	0.2	0.53	0.2	0.32	20	53	20	32	45	25.4	27	15.6	0	31.5
				0.4	0.65	0.4	0.39	40	65	40	39						
				0.8	0.82	0.8	0.49	80	82	80	49						
QUINDIO	2.66	48.82	15.9	0.2	0.34	0.2	0.18	20	34	20	18	29	17.8	13	20.2	0	27.1
				0.4	0.44	0.4	0.3	40	44	40	30						
				0.8	0.54	0.8	0.41	80	54	80	41						

Tabla 5.3.10.  
Parámetros cortes zona piloto 3

LOCAL	GRAVEDAD ESPECÍFICA Gs	HUMEDAD NATURAL %	PESO UNITARIO kN/m³	Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia Pico		Resistencia Residual		Resistencia NC	
				$\sigma$ kg/cm²	$\tau$ kg/cm²	$\sigma$ kg/cm²	$\tau$ kg/cm²	$\sigma$ kPa	$\tau$ kPa	$\sigma$ kPa	$\tau$ kPa	ce kPa	$\phi_e$ kPa	c <sub>RES</sub> kPa	$\phi_{RES}$ kPa	c <sub>NC</sub> kPa	$\phi_{NC}$ kPa
BARRANQUILLA		22.45	20.4	1.432	1.52	1.432	0.72	143.2	152	143.2	72	99	15.7	34	12.2	0	15.4
				4.147	1.9	4.147	1.09	414.7	190	414.7	109						
				6.856	3.05	6.856	1.89	685.6	305	685.6	189						
BARRANQUILLA		21.59	21.0	1.015	1.92	1.015	0.75	101.5	192	101.5	75	121	34.8	65	5.4	0	17.3
				2.014	2.61	2.014	0.84	201.4	261	201.4	84						
				3.015	3.31	3.015	0.94	301.5	331	301.5	94						
BARRANQUILLA		20.15	21.1	2.789	7.28	2.789	1.41	278.9	728	278.9	141	478	38.6	30	19.8	0	22.2
				5.504	8.65	5.504	2.05	550.4	865	550.4	205						
				8.218	11.62	8.218	3.36	821.8	1162	821.8	336						
BARRANQUILLA		25.92	20.3	0.511	0.7	0.511	0.28	51.1	70	51.1	28	50	22.1	8	17.8	0	20.3
				1.006	0.93	1.006	0.35	100.6	93	100.6	35						
				1.997	1.31	1.997	0.74	199.7	131	199.7	74						
BARRANQUILLA		26.94	19.0	1.432	3.8	1.432	0.67	143.2	380	143.2	67	244	43.7	5	27.4	0	26.6
				2.789	5.1	2.789	1.76	278.9	510	278.9	176						
				4.147	6.39	4.147	2.08	414.7	639	414.7	208						
BARRANQUILLA		43.25	17.8	1.432	2.03	1.432	0.73	143.2	203	143.2	73	77	41.6	25	23.5	0	24.7
				2.79	3.27	2.79	1.74	279	327	279	174						
				4.147	4.44	4.147	1.91	414.7	444	414.7	191						
BARRANQUILLA		24.7															
BARRANQUILLA		19.95	18.9	1.997	4.17	1.997	0.67	199.7	417	199.7	67	356	16.3			0	31.8
				2.998	4.37	2.998	1.1	299.8	437	299.8	110						
				3.978	4.75	3.978	2.47	397.8	475	397.8	247						
BARRANQUILLA		48.13	17.5	1.472	0.4	1.472	0.35					64	19.7	15	16.0	0	17.8
				2.866	1.67	2.866	0.97	286.6	167	286.6	97						
				4.262	2.17	4.262	1.37	426.2	217	426.2	137						
BARRANQUILLA		30.2	18.8	1.519	2.73	1.519	0.7	151.9	273	151.9	70	185	33.5	26	24.5	0	26.7
				1.997	3.37	1.997	1.54	199.7	337	199.7	154						
				2.988	3.77	2.988	1.5	298.8	377	298.8	150						
BARRANQUILLA		23.43	19.7	1.472	6.73	1.472	1.4	147.2	673	147.2	140	646	-5.3	72	19.9	0	25.4
				5.803	4.86	5.803	2.44	580.3	486	580.3	244						
				8.517	6.32	8.517	4.04	851.7	632	851.7	404						
BARRANQUILLA		22.73	21.2	1.006	0.7	1.006	0.43	100.6	70	100.6	43	21	25.4	20	11.6	0	15.6
				1.997	1.14	1.997	0.56	199.7	114	199.7	56						
				3.008	1.65	3.008	0.84	300.8	165	300.8	84						
BARRANQUILLA		30.43	20.5	1.472	0.96	1.472	0.65	147.2	96	147.2	65	75	17.8	40	7.2	0	11.3
				2.866	2.06	2.866	0.66	286.6	206	286.6	66						
				5.803	2.49	5.803	1.16	580.3	249	580.3	116						
BARRANQUILLA		23.33	20.1	1.263	0.56	1.263	0.41	126.3	56	126.3	41	16	26.2	29	9.1	0	13.3
				1.997	1.14	1.997	0.76	199.7	114	199.7	76						
				2.993	1.63	2.993	0.71	299.3	163	299.3	71						
BARRANQUILLA		14.83	21.7	1.472	2.04	1.472	0.3	147.2	204	147.2	30	178	13.7	13	10.5	0	11.2
				2.866	2.63	2.866	0.81	286.6	263	286.6	81						
				5.734	3.13	5.734	1.14	573.4	313	573.4	114						
BARRANQUILLA		25.61	19.9	1.263	0.64	1.263	0.34	126.3	64	126.3	34	31	18.4	13	17.5	0	18.4
				1.997	1.1	1.997	1.03	199.7	110	199.7	103						
				3.978	1.6	3.978	1.32	397.8	160	397.8	132						
BARRANQUILLA		37.2	17.4	1.413	2.59	1.413	1.03	141.3	259	141.3	103	194	22.7	61	17.8	0	24.8
				2.752	2.96	2.752	1.56	275.2	296	275.2	156						
				4.091	3.71	4.091	1.89	409.1	371	409.1	189						
BARRANQUILLA		46.95	17.3	1.006	0.62	1.006	0.47	100.6	62	100.6	47	-8	32.0	-17	29.7	0	28.2
				1.997	1.03	1.997	0.83	199.7	103	199.7	83						
				2.988	1.86	2.988	1.6	298.8	186	298.8	160						
BARRANQUILLA		23.55	20.1	1.413	0.9	1.413	0.98	141.3	90	141.3	98	0	32.4	40	15.1	0	19.8
				2.752	1.75	2.752	0.84	275.2	175	275.2	84						
				5.505	5.52	5.505	1.98			550.5	198						
BARRANQUILLA		12.28	21.2	0	0	0	0					178	29.5			0	18.6
				2.09	2.96	2.09	0.57	209	296								
				4.031	4.06	4.031	1.36	403.1	406	403.1	136						
BARRANQUILLA		15.51	21.9	1.413	1.64	1.413	0.48	141.3	164	141.3	48	95	23.5	18	10.0	0	12.0
				2.752	2.04	2.752	0.58	275.2	204	275.2	58						
				5.505	3.38	5.505	1.17	550.5	338	550.5	117						

Tabla

5.3.11 Parámetros triaxiales zonas piloto 1, 2 y 3

LOCAL	ETAPA	SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		GRAVEDAD ESPECIFICA Gs	HUMEDAD NATURAL %	PESO UNITARIO kN/m3
				DE	A			
SABANA		TAB 1	M9	7.8	8.5	2.42	45.22	17.8
SABANA		TAB2	M7	4.7	5.2	2.78	39.09	18.5
QUINDIO		TEB1	M8	10.4	11.0		42.05	17.7

LOCAL	p'	medidos		Teóricos		Eo kPa		qult MH	
		kPa	Eo kPa	qult MH kPa	Eo kPa	qult MH kPa	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$
SABANA	75.00	7743	72.9	7951	75.4	101.143	1.011	1.372	0.928
	150.00	16894	153.6	16023	143.5				
	300.00	31445	263.8	32288	272.9				
SABANA	75.00	6926	113.8	8097	111.4	116.915	0.982	5.357	0.703
	150.00	21858	174.0	15989	181.4				
	300.00	27003	301.5	31572	295.3				
QUINDIO	75.00	35176	514.4	35176	514.4	1993.402	0.665	691.555	-0.069
	150.00	55768	490.5	55768	490.5				

MODELO CAM CLAY								
LOCAL	$\sigma_{1f}'$ kPa	$\sigma_{3f}'$ kPa	$p_f'$ kPa	qf kPa	qf/pf'	g kPa	h	M
SABANA	108.41	42.90	64.74	65.51	1.012	9.70	0.959	0.987
	212.35	76.50	121.78	135.85	1.116			
	400.85	162.20	241.75	238.65	0.987			
SABANA	146.20	51.00	82.73	95.20	1.151	12.16	1.002	1.051
	243.70	90.10	141.30	153.60	1.087			
	425.44	162.50	250.15	262.94	1.051			
QUINDIO	167.78	-17.40	44.33	185.18	4.178	152.29	0.742	1.646
	353.26	76.00	168.42	277.26	1.646			

MODELO MOHR COULOMB								
LOCAL	sf' kPa	tf kPa	ae kPa	$\alpha_e$ °	$\alpha_{NC}$ °	ce kPa	$\phi_e$ °	$\phi_{NC}$ °
SABANA	75.65	32.75	4.11	22.5	23.0	4.51	24.5	25.1
	144.42	67.92						
	281.52	119.32						
SABANA	98.60	47.60	5.21	23.2	24.1	5.77	25.4	26.6
	166.90	76.80						
	293.97	131.47						
QUINDIO	75.19	92.59	67.76	18.3	32.9	71.79	19.3	40.2
	214.63	138.63						

**ANEXO 6.1**

**PARÁMETROS ESFUERZO – DEFORMACIÓN PARA  
CONSTRUCCIÓN DE MODELOS CONSTITUTIVOS**

Tabla 6.1.1

Resultados PLAXIS Sabana de Bogotá- Curvas esfuerzo - deformación zona piloto 1

S2-M5		S2-M6		S2-M6		S1-M1		TAB1-M4		TAB1-M5		TAB1-M6		TAB1-M7		TAB1-M8		TAB1-M9		TAB1-M10	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa
-0.61	150.464	0.08	278.135	0.06	27.929	0.21	1.289	0.49	3.605	0.49	1.205	0.74	10.31	0.52	4.776	0.64	4.935	0.58	11.17	0.68	5.55
-0.17	295.37	0.20	598.506	0.16	88.601	0.26	2.577	1.18	13.842	1.13	2.393	1.53	16.176	1.10	7.122	1.34	6.617	1.21	18.338	1.42	9.015
0.26	368.477	0.30	891.101	0.25	158.211	0.38	3.861	2.01	21.772	2.04	3.321	2.32	21.947	1.69	9.675	2.02	7.788	1.85	26.609	2.16	12.178
0.70	404.095	0.43	1115.73	0.35	250.613	0.56	6.424	2.78	27.922	2.75	4.004	3.09	27.157	2.28	11.962	2.71	8.698	2.48	34.062	2.89	15.294
1.30	422.595	0.55	1244.05	0.47	354.097	0.86	10.674	3.54	32.615	3.52	4.004	3.88	31.811	2.88	14.221	3.41	9.357	3.11	41.179	3.63	18.115
1.83	435.537	0.68	1319.82	0.56	450.226	1.00	12.790	4.38	37.184	4.44	5.786	4.67	35.697	3.46	16.451	4.10	10.004	3.74	47.728	4.37	20.649
2.44	456.619	0.81	1372.35	0.66	535.368	1.14	14.901	5.14	41.439	5.14	6.433	5.45	38.605	4.06	18.424	4.79	10.641	4.38	53.482	5.10	23.384
2.96	473.649	0.94	1409.91	0.76	629.993	1.26	17.009	5.97	45.386	5.99	7.286	6.22	41.229	4.65	20.141	5.48	11.034	5.02	58.663	5.84	25.594
3.48	479.308	1.07	1442.31	0.87	712.436	1.54	21.199	6.67	48.205	6.69	8.136	7.00	43.134	5.24	21.836	6.16	11.42	5.65	62.916	6.57	27.766
3.91	491.26	1.21	1466.05	0.97	793.581	1.85	25.360	7.57	50.9	7.54	8.951	7.79	44.995	5.83	23.281	6.85	11.567	6.29	66.838	7.32	29.663
4.61	510.655	1.34	1475.74	1.06	861.255	2.11	29.507	8.33	52.875	8.38	9.756	8.57	46.162	6.42	24.482	7.55	11.941	6.92	70.028	8.05	31.531
5.04	509.332	1.47	1491.61	1.17	929.39	2.44	33.612	9.10	54.231	9.09	10.561	9.35	47.084	7.02	25.667	8.24	12.079	7.56	72.927	8.79	33.365
5.57	510.183	1.60	1512.85	1.27	993.276	2.78	37.680	9.93	55.474	9.93	11.344	10.13	47.979	7.61	26.834	8.93	12.214	8.19	75.347	9.52	34.933
6.17	510.158	1.74	1526.04	1.38	1054.05	3.21	41.683	10.76	56.47	10.63	12.121	10.92	48.852	8.19	27.765	9.62	12.347	8.82	77.06	10.27	36.468
6.78	507.321	1.86	1527.46	1.46	1095.53	4.16	44.575	11.46	57.1	11.48	13.078	11.70	49.919	8.79	28.463	10.32	12.252	9.45	78.735	11.00	37.253
7.30	511.892	2.00	1537.75	1.56	1146.4	4.18	43.739	12.29	57.834	12.32	14.016	12.47	50.322	9.38	28.93	11.01	12.599	10.10	80.154	11.73	39.239
7.83	524.327	2.13	1547.49	1.67	1197.9	4.23	43.305	13.13	58.544	13.03	14.746	13.26	50.919	9.96	29.395	11.70	12.501	10.73	80.897	12.47	40.248
8.44	505.649	2.26	1559.25	1.77	1238.91	4.51	41.120	13.82	58.909	13.87	15.646	14.06	51.285	10.55	29.632	12.40	12.62	11.36	81.627	13.22	41.441
8.96	485.64	2.40	1565.98	1.86	1270.04	4.97	38.879	14.58	59.165	14.58	16.345	14.83	52.257	11.14	29.862	13.09	12.521	11.99	82.125	13.95	42.403
9.57	467.704	2.53	1564.38	1.97	1310.51	5.46	36.640	15.49	59.608	15.42	16.989	15.61	52.8	11.73	30.086	13.78	12.421	12.62	82.387	14.69	43.559
10.17	445.448	2.66	1566.72	2.07	1338.69	5.87	34.456	16.18	59.929	16.13	17.456	16.39	53.323	12.32	30.098	14.47	12.534	13.27	82.622	15.42	44.263
10.70	440.362	2.79	1575.31	2.18	1361.26			17.01	60.135	16.97	18.084	17.18	53.219	12.91	29.892	15.16	12.432	13.91	82.859	16.16	44.72
11.22	444.994	2.93	1582.34	2.26	1384.77			17.85	60.326	17.82	18.895	17.96	53.116	13.51	29.688	15.85	12.539	14.53	82.249	16.90	45.17
11.83	431.721	3.07	1579.29	2.37	1396.18			18.68	60.696	18.52	19.324	18.74	53.399	14.10	29.486	16.55	12.436	15.16	81.438	17.63	45.19
12.35	424.507	3.20	1574.08	2.47	1373.44			19.38	60.763	19.44	19.905	19.52	53.86	14.70	29.486	17.23	12.334	15.80	80.829	18.37	45.825
12.61	418.433	3.33	1573.46	2.58	1356.51			20.21	60.906	20.14	20.311	20.31	54.101	15.28	29.077	17.93	12.435	16.44	79.609	19.11	45.821
12.61	418.433	3.46	1572.82	2.67	1323.19			21.04	61.17	20.99	20.862	21.09	53.569	15.87	28.676	18.62	12.33	17.08	78.592	19.85	46.013
12.61	418.433	3.60	1568.39	2.68	1319.76			21.74	61.199	21.83	21.207	21.87	53.419	16.47	28.072	19.31	12.426	17.71	77.789	20.58	45.795
12.61	418.433	3.73	1556.01	2.68	1319.76			22.57	61.295	22.54	21.767	22.64	53.63	17.06	27.673	20.00	12.319	18.34	76.392	21.31	45.772
12.61	418.433	3.86	1511.47	2.68	1319.76			23.40	61.375	23.38	22.086	23.44	54.012	17.65	27.475	20.68	12.214	18.98	74.802	22.05	46.134
12.61	418.433	3.90	1490.01	2.68	1319.76			24.10	61.368	24.09	22.414	24.22	53.276	18.24	27.082	21.37	12.303	19.32	73.895	22.79	46.093
		3.90	1490.01					24.93	61.419	24.93	22.71	24.33	52.835			22.07	12.389	19.32	73.895	23.53	46.04

Tabla 6.1.2

Resultados PLAXIS Sabana de Bogotá- Curvas esfuerzo - deformación zona piloto 2- Parte 1

MN1-M1		MN1-M2		MN1-M3		MN1-M4		MN1-M7		MN1-M8	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa	Unitaria	kPa
0.07	4.977	0.11	4.756	0.12	5.66	0.05	1.166	0.12	8.89	0.12	11.424
0.20	10.889	0.26	8.073	0.30	8.711	0.11	4.196	0.27	14.95	0.26	18.062
0.31	14.661	0.40	10.433	0.46	10.577	0.18	6.522	0.42	20.059	0.42	23.491
0.43	18.423	0.56	12.784	0.63	12.435	0.26	8.612	0.57	24.918	0.57	28.429
0.54	22.177	0.71	15.364	0.79	14.289	0.33	10.234	0.71	29.531	0.71	32.41
0.66	25.919	0.86	17.937	0.96	15.903	0.41	12.086	0.86	33.902	0.86	36.611
0.78	29.892	1.01	20.502	1.13	17.976	0.48	13.702	1.01	38.717	1.03	40.798
0.89	34.086	1.16	23.059	1.29	19.578	0.56	15.547	1.16	43.057	1.17	44.743
1.00	37.805	1.31	25.61	1.47	21.404	0.63	16.929	1.31	47.383	1.33	48.434
1.11	41.75	1.45	28.152	1.63	23.227	0.71	17.842	1.46	51.466	1.48	52.114
1.24	45.917	1.61	30.686	1.79	24.812	0.78	18.291	1.61	55.075	1.62	54.616
1.35	49.844	1.76	32.744	1.97	26.389	0.85	19.436	1.76	58.672	1.78	57.806
1.47	54.456	1.90	34.561	2.13	27.963	0.93	20.808	1.91	62.254	1.94	60.752
1.58	58.126	2.05	35.91	2.31	29.297	1.01	22.409	2.07	65.371	2.08	63.23
1.71	62.716	2.20	36.553	2.47	30.86	1.07	23.778	2.21	68.477	2.24	64.76
1.82	66.139	2.36	33.94	2.64	32.184	1.15	25.145	2.36	71.574	2.39	66.053
1.93	69.786	2.51	33.191	2.80	33.507	1.23	26.739	2.50	73.98	2.53	67.814
2.05	73.652	2.66	33.371	2.97	34.599	1.29	28.103	2.66	76.603	2.69	69.329
2.16	76.581	2.80	34.016	3.14	35.908	1.37	29.462	2.81	79.222	2.83	69.69
2.29	79.961	2.95	34.657	3.30	36.533	1.45	30.589	2.96	80.686	2.99	70.734
2.40	82.648	3.10	35.067	3.47	37.378	1.51	31.718	3.11	82.377	3.14	69.697
2.52	85.318	3.25	35.01	3.64	37.317	1.59	32.609	3.26	83.609	3.29	69.599
2.64	87.3	3.40	34.265	3.80	36.346	1.67	32.585	3.41	83.926	3.44	70.402
2.75	89.034	3.56	33.521	3.97	34.238	1.74	32.789	3.56	84.474	3.60	71.208
2.87	89.855	3.69	32.785	4.13	33.275	1.81	33.223	3.71	84.794	3.74	71.561
2.98	89.752	3.84	31.818	4.31	32.312	1.89	33.886	3.86	84.437	3.90	71.674
3.10	89.184	4.00	30.169	4.46	31.806	1.97	34.314	4.00	84.992	4.05	72.015
3.21	87.475	4.15	28.752	4.63	31.752	2.03	32.234	4.15	85.078	4.20	72.593
3.28	84.887	4.30	26.199	4.80	31.695	2.11	30.609	4.30	84.497	4.35	72.474
3.28	84.887	4.45	23.432	4.97	31.641	2.19	28.759	4.46	82.798	4.51	72.129
3.28	84.887	4.60	21.35	5.14	31.806	2.25	26.459	4.61	81.328	4.65	70.89
3.28	84.887	4.75	19.729	5.31	31.975	2.34	27.576			4.81	68.728

Tabla 6.1.3

Resultados PLAXIS Sabana de Bogotá- Curvas esfuerzo - deformación zona piloto 2- Parte 2

TEB3-M1		TEB3-M2		TEB3-M3		TEB3-M4		TEB3-M6		TEB3-M7		TEB3-M8	
Deformación Unitaria	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria	Esfuerzo kPa
0.12	4.552	0.09	6.223	0.05	2.149	0.17	4.758	0.11	0.239	0.01	0	0.33	17.672
0.29	9.327	0.24	11.234	0.14	7.874	0.38	9.023	0.27	0.956	0.07	1.931	0.70	28.313
0.44	12.656	0.37	14.8	0.22	11.682	0.58	12.559	0.42	1.67	0.11	3.861	1.06	39.353
0.59	15.735	0.51	18.591	0.31	15.007	0.78	15.843	0.56	2.621	0.17	6.029	1.41	51.258
0.76	19.04	0.65	21.9	0.40	18.8	0.98	18.881	0.72	3.568	0.21	7.473	1.78	63.306
0.92	21.863	0.79	25.671	0.49	21.638	1.18	21.669	0.87	4.513	0.27	9.155	2.14	74.565
1.07	24.438	0.92	28.959	0.57	24.233	1.38	24.679	1.01	5.455	0.32	10.596	2.49	84.104
1.24	27.238	1.06	32.948	0.66	26.821	1.58	27.678	1.17	6.393	0.37	12.515	2.86	88.905
1.39	29.561	1.20	36.691	0.74	29.407	1.79	30.899	1.32	7.566	0.42	13.712	3.22	88.577
1.55	31.876	1.33	40.423	0.83	31.752	1.99	33.869	1.47	9.207	0.47	15.149	3.51	84.145
1.71	34.179	1.48	44.611	0.91	34.092	2.19	37.064	1.63	11.077	0.53	16.822	3.51	84.145
1.87	36.008	1.61	48.562	1.01	36.663	2.40	40.475	1.78	12.944	0.57	18.256	3.51	84.145
2.03	38.064	1.75	52.725	1.09	38.759	2.59	43.644	1.93	15.509	0.63	19.926	3.51	84.145
2.20	39.875	1.89	56.885	1.17	40.852	2.79	47.03	2.09	18.534	0.67	21.356	3.51	84.145
2.35	41.217	2.04	61.498	1.26	43.171	2.99	50.167	2.23	21.316	0.73	23.262	3.51	84.145
2.52	42.783	2.16	65.398	1.35	45.256	3.20	53.524	2.39	24.555	0.77	24.451	3.51	84.145
2.68	44.116	2.30	69.288	1.43	47.573	3.40	57.093	2.54	27.555	0.82	26.117	3.51	84.145
2.83	45.208	2.44	73.63	1.53	49.647	3.61	60.651	2.68	30.543	0.87	27.298	3.51	84.145
3.00	45.831	2.58	77.258	1.61	51.717	3.81	64.189	2.84	33.52	0.92	28.721	3.51	84.145
3.15	46.452	2.73	81.575	1.69	53.556	4.01	67.716	2.99	36.256	0.97	30.141	3.51	84.145
3.32	46.842	2.85	85.186	1.79	56.084	4.20	70.775	3.14	38.758	1.03	31.322	3.51	84.145
3.48	46.761	3.00	88.317	1.88	57.678	4.41	73.362	3.30	41.241	1.08	32.261	3.51	84.145
3.64	46.455	3.13	91.212	1.96	59.269	4.60	75.709	3.45	43.03	1.13	32.724	3.51	84.145
3.79	46.15	3.28	94.317	2.05	60.614	4.81	77.587	3.60	43.656	1.18	33.182	3.51	84.145
3.96	44.918	3.41	96.971	2.13	61.498	5.01	78.782	3.76	46.121	1.23	33.882	3.51	84.145
4.11	44.156	3.54	99.147	2.22	61.913	5.21	79.52	3.90	47.89	1.27	34.822	3.51	84.145
4.14	43.91	3.68	101.534	2.30	61.627	5.42	79.573	4.05	49.428	1.33	35.278	3.51	84.145
4.14	43.91	3.82	102.314	2.40	61.803	5.62	76.03	4.21	50.264	1.37	35.976	3.51	84.145
4.14	43.91	3.97	102.395	2.48	61.284	5.63	75.565	4.35	50.185	1.43	35.956	3.51	84.145
4.14	43.91	4.09	101.333	2.56	61.232	5.63	75.565	4.50	50.109	1.48	34.749	3.51	84.145
4.14	43.91	4.24	98.66	2.65	61.171	5.63	75.565	4.66	48.656	1.53	34.968	3.51	84.145
4.14	43.91	4.34	96.718	2.70	57.886	5.63	75.565			1.58	35.427	3.51	84.145

Tabla 6.1.4

Resultados PLAXIS Sabana de Bogotá- Curvas esfuerzo - deformación zona piloto 3- Parte 1

P55-M9		P56-M8		P57-M8		P57-M9		P57-M10		P57-M11		P57-M12		P57-M14	
Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.095	9.641	0.079	7.795	0.082	8.493	0.098	3.337	0.139	11.257	0.098	2.068	0.135	12.274	0.080	10.344
0.189	19.265	0.159	12.116	0.164	38.188	0.196	6.667	0.278	30.913	0.195	5.166	0.270	19.261	0.161	19.638
0.284	28.869	0.238	21.618	0.246	59.355	0.294	9.990	0.417	49.111	0.293	12.386	0.405	26.230	0.241	33.047
0.378	40.379	0.317	30.241	0.328	77.945	0.392	14.416	0.556	70.061	0.391	22.686	0.541	41.911	0.321	49.531
0.473	60.511	0.397	41.440	0.410	101.584	0.490	17.726	0.694	90.952	0.488	35.025	0.676	50.574	0.401	72.174
0.567	78.685	0.476	51.759	0.492	126.876	0.588	23.242	0.833	111.784	0.586	49.399	0.811	60.954	0.482	91.690
0.662	99.701	0.556	62.923	0.574	160.577	0.686	27.642	0.972	135.348	0.684	61.688	0.946	73.045	0.562	115.293
0.756	119.719	0.635	72.346	0.656	186.623	0.784	33.138	1.111	163.026	0.781	77.035	1.081	86.840	0.642	143.999
0.851	143.526	0.714	81.755	0.738	219.375	0.882	38.622	1.250	185.060	0.879	94.403	1.216	97.128	0.722	164.438
0.945	169.200	0.794	94.588	0.820	244.485	0.980	44.096	1.389	212.589	0.977	112.762	1.351	109.119	0.803	195.112
1.134	219.444	0.952	121.909	0.984	302.997	1.176	55.011	1.667	263.256	1.172	151.416	1.622	129.548	0.963	266.564
1.323	266.639	1.111	150.856	1.148	369.717	1.373	63.686	1.944	310.870	1.367	194.002	1.892	142.972	1.124	312.193
1.512	327.908	1.270	181.422	1.311	427.825	1.569	72.326	2.222	365.098	1.563	231.322	2.162	137.425	1.284	367.892
1.701	388.939	1.429	211.888	1.475	485.738	1.765	78.744	2.500	412.145	1.758	274.595	2.432	119.915	1.445	448.914
1.890	449.734	1.587	246.520	1.639	539.275	1.961	87.319	2.778	465.767	1.953	315.664	2.703	102.499	1.605	499.113
2.363	612.461	1.984	331.333	2.049	682.734	2.157	86.055	3.472	563.088	2.441	412.056	3.378	16.965	2.006	639.099
2.836	778.280	2.381	394.297	2.459	820.827	2.255	79.440	3.611	570.427	2.930	482.345			2.408	767.820
3.308	948.056	2.540	418.154	2.869	965.993	2.451	79.280	3.750	594.017	3.027	492.903			2.648	856.627
3.781	1104.993	2.698	438.558	3.279	1095.105	2.941	88.607	3.889	622.953	3.076	476.600			2.729	886.130
4.253	1256.646	2.857	447.946	3.361	1067.891	3.235	88.338	4.028	649.099	3.223	470.871			2.809	915.583
4.348	1274.791	2.937	412.245	3.443	1050.570	3.431	91.385	4.167	681.918	3.418	489.917			2.970	979.362
4.631	1279.295	3.016	403.502	3.525	902.067	3.922	90.921	4.861	797.625	3.516	449.469			3.210	1082.140
4.726	1186.083			3.607	819.364	4.020	90.828	5.139	832.722	3.613	419.080			3.612	1257.262
4.820	1074.682			3.689	491.200	4.118	90.735	5.278	734.072	3.711	388.751			4.013	1430.889
4.915	917.620					4.412	89.393	5.556	758.534	3.809	378.399			4.414	1603.020
						4.608	84.961	5.694	664.402					4.815	1763.803
						4.902	81.523	5.833	610.350					4.896	1782.006
						5.392	78.996	5.972	529.956					5.177	1668.396
						5.882	73.348	6.250	435.922					5.297	1470.569
						6.373	67.754							5.457	1174.462

Tabla 6.1.5

Resultados PLAXIS Sabana de Bogotá- Curvas esfuerzo - deformación zona piloto 3- Parte 2

P46-M3		P46-M10		P47-M7		P47-M11		P48-M4		P48-M6		P48-M9	
Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.078	2.475	0.078	4.388	0.077	3.290	0.079	8.604	0.078	0.756	0.083	2.376	0.084	0.802
0.157	4.122	0.156	9.645	0.154	5.753	0.159	18.915	0.155	2.267	0.167	3.165	0.169	1.602
0.235	5.767	0.234	20.152	0.232	8.213	0.238	36.081	0.233	3.020	0.250	3.953	0.253	2.402
0.314	7.409	0.312	30.642	0.309	10.668	0.317	51.504	0.311	6.035	0.333	4.740	0.338	3.999
0.392	9.048	0.390	45.489	0.386	12.300	0.397	71.190	0.388	6.784	0.417	5.525	0.422	6.394
0.471	10.685	0.468	59.439	0.463	14.748	0.476	89.131	0.466	7.532	0.500	6.309	0.507	7.187
0.549	12.319	0.546	76.861	0.541	18.830	0.556	105.331	0.543	8.278	0.583	7.092	0.591	8.776
0.628	13.950	0.624	91.637	0.618	24.542	0.635	124.071	0.621	8.272	0.667	7.873	0.676	9.566
0.706	16.399	0.702	104.646	0.695	30.245	0.714	140.217	0.699	8.266	0.750	7.866	0.760	10.354
0.785	19.663	0.780	127.219	0.772	36.756	0.794	158.045	0.776	8.259	0.833	8.646	0.845	11.141
0.942	23.722	0.936	147.899	0.927	51.379	0.952	191.909	0.932	9.745	1.000	8.631	1.014	12.711
1.099	29.402	1.092	178.067	1.081	66.770	1.111	214.594	1.087	11.227	1.167	8.225	1.182	14.276
1.256	35.879	1.248	208.140	1.236	81.299	1.270	210.849	1.242	12.704	1.333	7.820	1.351	17.418
1.413	43.963	1.404	242.447	1.390	99.030	1.429	84.883	1.398	13.430	1.500	7.807	1.520	19.760
1.570	48.770	1.560	263.676	1.544	114.274			1.553	14.154	1.667	7.794	1.689	20.515
1.962	63.148	1.677	280.632	1.931	147.731			1.941	14.840	2.083	6.597	2.111	22.784
2.355	75.797	1.716	289.152	2.008	152.455			2.329	14.782	2.500	6.182	2.534	25.032
2.747	84.326	1.794	308.759	2.085	154.753			2.717	13.987	3.333	3.065	2.787	26.527
3.140	91.185	1.950	340.129	2.162	148.993			3.106	13.198	3.750	0.763	2.956	25.702
3.336	87.807	2.106	369.678	2.317	120.614			3.882	12.365			3.378	25.591
3.532	85.239	2.340	411.677	2.471	56.198			4.270	10.866			3.801	25.479
3.925	81.719	2.496	445.271	2.703	48.055			4.658	9.379			4.223	26.904
4.317	79.014	2.730	491.185					5.047	7.904			4.645	27.551
4.710	47.214	3.120	565.789					5.435	5.725			5.068	27.048
5.495	23.413	3.276	581.867					6.211	2.129			5.490	21.239
		3.354	602.616									5.912	11.327
		3.510	636.386									6.334	9.021
		3.666	676.812									6.757	6.735
		3.822	709.502									7.601	3.708
		3.900	739.309										
		4.290	815.319										
		4.680	852.178										
		4.782	668.975										
		5.070	416.842										

Tabla 6.1.6

Resultados PLAXIS Sabana de Bogotá- Curvas esfuerzo - deformación zona piloto 3- Parte 3

P49-M5		P49-M11		P50-M9		P51-M12		P53-M10		P54-M6		P54-M11	
Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa	Deformación Unitaria ε (%)	Esfuerzo kPa
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.095	7.497	0.079	15.590	0.078	14.466	0.079	16.673	0.079	18.022	0.078	9.590	0.079	17.435
0.191	16.643	0.158	38.943	0.155	38.846	0.158	32.443	0.157	36.015	0.157	26.133	0.158	34.843
0.286	23.278	0.237	61.395	0.233	55.967	0.237	52.568	0.236	71.073	0.235	37.428	0.238	52.223
0.382	35.715	0.315	82.083	0.311	79.375	0.316	73.537	0.315	89.895	0.313	47.835	0.317	73.924
0.477	41.489	0.394	107.919	0.389	103.648	0.395	100.596	0.394	114.974	0.392	56.488	0.396	95.591
0.573	39.791	0.473	129.400	0.466	135.087	0.474	122.367	0.472	143.604	0.470	64.259	0.475	117.222
0.668	39.753	0.552	155.157	0.544	161.978	0.552	148.471	0.551	165.911	0.549	78.091	0.555	138.820
0.763	38.887	0.631	180.873	0.622	190.625	0.631	172.788	0.630	197.143	0.627	90.167	0.634	164.717
0.859	38.023	0.710	208.269	0.699	218.329	0.710	196.194	0.709	232.803	0.705	95.294	0.713	190.573
0.954	37.161	0.789	234.762	0.777	246.887	0.789	217.820	0.787	263.932	0.784	112.531	0.792	212.060
1.145	35.441	0.946	283.327	0.932	304.764	0.947	269.667	0.945	312.643	0.940	120.996	0.951	259.250
1.336	34.550	1.104	342.880	1.088	362.458	1.105	325.690	1.102	383.494	1.097	135.474	1.109	301.974
1.527	24.631	1.262	393.683	1.243	420.863	1.263	381.533	1.260	445.213	1.254	150.766	1.268	379.016
1.718	16.389	1.420	440.049	1.399	477.298	1.421	441.525	1.417	504.066	1.411	169.451	1.426	421.409
1.908	8.178	1.577	494.797	1.554	538.897	1.579	501.322	1.575	576.931	1.567	188.933	1.585	472.250
2.385	5.697	1.972	624.515	1.943	687.599	1.973	637.053	1.969	733.749	1.959	239.503	1.981	607.177
2.863	4.049	2.366	753.173	2.331	830.687	2.368	776.820	2.362	889.290	2.351	289.663	2.377	749.516
3.340	0.806	2.760	876.558	2.642	920.538	2.762	922.268	2.756	1061.091	2.743	323.290	2.773	899.162
		3.155	990.523	2.720	704.155	3.157	1063.107	3.150	1222.738	3.135	363.398	3.170	1056.011
		3.549	1095.171	3.186	437.988	3.552	1185.828	3.543	1383.036	3.527	384.654	3.566	1177.893
		3.628	1077.569	3.341	174.914	3.946	1315.945	3.937	1515.996	3.605	378.454	3.962	1315.496
		3.707	1001.570	3.497	0.000	4.341	1453.354	4.331	1639.193	3.683	336.130	4.358	1543.712
		3.864	833.274			4.578	1529.367	4.646	1711.187	3.918	83.827	4.754	1603.796
		3.943	416.295					4.724	171.837			5.151	1655.051
		4.022	0.000					5.118	85.563				