

**EFFECTO DEL SECADO Y LOS CONTAMINANTES EN EL COLAPSO Y ERODABILIDAD DE
UN SUELO RESIDUAL TROPICAL DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO**

ANDRÉS BERRÍO ALZATE

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN, COLOMBIA
2013**

**EFFECTO DEL SECADO Y LOS CONTAMINANTES EN EL COLAPSO Y ERODABILIDAD DE
UN SUELO RESIDUAL TROPICAL DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO**

ANDRÉS BERRÍO ALZATE

**TRABAJO DIRIGIDO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR
OSCAR ECHEVERRI RAMÍREZ. I.C., MSc.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN, COLOMBIA
2013**

"I presented my theories and did my experiments, with the purpose of establishing an aid in the formation of a proper engineering view and I realized with horror that are still considered by most to be a substitute for common sense and experience..."

Karl Von Terzaghi. 1957.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincera gratitud:

A mi orientador, el Ingeniero Oscar Echeverri Ramírez, por su dedicación y acompañamiento en el desarrollo de esta ardua tarea, por su disposición siempre que su ayuda fue necesaria, por su pasión en el ejercicio de la docencia y por ese particular don de gente, que le hace capaz de formar, no sólo en el ámbito académico, sino también en el personal. Por creer en las ideas, y hacer posible que éstas se materialicen.

A la Profesora Yamile Valencia González, por su valioso aporte técnico y buenas sugerencias en cuanto a las metodologías empleadas y análisis de los resultados.

Al Laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Facultad de Minas, como espacio que acogió toda la etapa experimental que se llevó a cabo.

Al Laboratorio de Suelos de Inteinsa S.A., como apoyo en aquellas pruebas que necesitaron verificación y soporte para los resultados.

A los laboratorios de Microscopía Avanzada y de Caracterización de Materiales, pertenecientes a la Facultad de Minas, por la buena disposición para contribuir en el desarrollo de los ensayos asociados a cada uno de ellos.

A mis compañeros: María Angélica Duque, Santiago Osorio, Daniel Toscano, Francisco Ordoñez y en general a todos los que hacen parte del área de Geotecnia de la Facultad de Minas, quienes en algún momento hicieron su aporte para el avance satisfactorio de este trabajo.

RESUMEN

EFFECTO DEL SECADO Y LOS CONTAMINANTES EN EL COLAPSO Y ERODABILIDAD DE UN SUELO RESIDUAL TROPICAL DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO.

Los suelos que se desarrollan en la región intertropical, producto de la meteorización de las rocas, presentan diferencias substanciales con respecto a los grandes depósitos sedimentarios que constituyen los suelos de los climas templados, especialmente por la acción de agentes como la temperatura, los altos regímenes de precipitaciones y el relieve, que los convierten en un medio más complejo y heterogéneo.

Con el propósito de estudiar el comportamiento geotécnico, del que puede considerarse un suelo residual tropical, se trabajó con muestras extraídas de un estrato meteorizado, originado a partir de la descomposición de las rocas ígneas del Batolito Antioqueño, en un afloramiento situado en el municipio de Guarne, al Oriente cercano de la ciudad de Medellín, Antioquia.

Dos sustancias contaminantes se adicionaron con el objetivo de valorar la susceptibilidad de las propiedades del suelo ante su presencia; la primera de ellas es una solución jabonosa, que busca representar la eventual infiltración de aguas residuales, lo que es común en zonas con sistemas de saneamiento insuficientes, y la segunda sustancia es gasolina, la cual representa la contaminación del subsuelo por derrames o fugas en las redes de suministro. Se realizaron una serie de pruebas de laboratorio, bajo diversas condiciones de secado, haciendo énfasis en las propiedades índice del suelo, y en dos de los fenómenos hidromecánicos menos estudiados hasta ahora: El Colapso y la Erodabilidad.

Finalmente, a la luz de los resultados, se pudo estimar lo desfavorable que puede llegar a ser, para propósitos ingenieriles, la interacción del suelo con sustancias ajenas a su naturaleza. Presentando como caso más crítico, las muestras contaminadas con gasolina, en las que el índice de colapso se duplicó y se clasificó el suelo como altamente dispersivo y erodable.

Palabras claves – Suelo Residual Tropical, Suelos Colapsables, Suelos Erodables, Contaminantes, Secado del Suelo.

ABSTRACT

DRYING EFFECT AND THE POLLUTANTS IN THE COLLAPSE AND ERODIBILITY PROPERTIES OF A TROPICAL RESIDUAL SOIL FROM BATOLITO ANTIOQUEÑO

Soils developed in the intertropical region, product of the weathering of rocks, present substantial differences respect to the large sedimentary deposits that constitute the soils of temperate climates, especially because of the agents actions like the temperature, the rainfall regimes and the setoff, which makes it a more complex and heterogeneous medium.

With the proposal of studying the geotechnical behavior of a tropical residual soil, the work was made with samples taken from a weathered layer, originated by the weathering of igneous rocks from Batolito Antioqueño, specifically in an outcrop located in Guarne municipality, in the Medellín nearby east.

Two pollutants substances were added the aim of valorate the susceptibility of the soil properties with the presence of them; first of them is the soapy solution, which represents the eventual infiltration of sewage, which is common in zones with inadequate sanitation systems, and the second substance is gasoline, which represents the pollution by spills or leaks in the supply networks. Different Lab tests were performed under various drying conditions, emphasizing in the soil index properties, and two of the hydromechanical phenomenon studied so far: Collapse and Erodibility.

Finally, having accounted the results, it is possible to evaluate how unfavorable it could be at the engineering topic, the interaction of the soil with substances foreign to its nature. Showing as the most critical case, the polluted samples with gasoline, where the collapse index doubled and qualified the soil as highly dispersive and erodible.

Keywords – Tropical Residual Soil, Collapsible Soils, Erodible Soils, Pollutants, Soil Drying.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONSIDERACIONES INICIALES.....	1
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. METEORIZACIÓN TROPICAL.....	4
2.3. FASES DE UN SUELO RESIDUAL TROPICAL.....	5
2.4. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	6
2.5. SECADO DEL SUELO.....	6
2.6. CONSISTENCIA DEL SUELO Y PLASTICIDAD.....	7
2.7. SUELOS COLAPSABLES.....	8
2.8. SUELOS DISPERSIVOS.....	9
3. METODOLOGÍA	11
3.1. ETAPA DE EXPLORACIÓN.....	11
3.1.1. Ubicación del Sitio.....	12
3.1.2. Geología Regional.....	13
3.1.3. Perfil de meteorización del sitio de estudio.....	15
3.1.4. Estrato de suelo estudiado.....	17
3.1.5. Recolección de muestras.....	19
3.2. ADICIÓN DE CONTAMINANTES.....	20
3.2.1. Solución Agua-Jabón.....	21
3.2.2. Gasolina.....	22
3.3. ETAPA EXPERIMENTAL.....	22
3.3.1. Caracterización física.....	23
3.3.1.1. Contenido de humedad.....	23

3.3.1.2.	Peso específico de sólidos	23
3.3.1.3.	Análisis Granulométrico	24
3.3.1.4.	Límites de consistencia.....	25
3.3.1.5.	Clasificación expedita MCT	26
3.3.2.	Caracterización química y mineralógica	28
3.3.2.1.	Potencial de Hidrógeno – pH	28
3.3.2.2.	Microscopía Electrónica de Barrido – SEM.....	29
3.3.2.3.	Difracción de rayos X.....	30
3.3.3.	Caracterización hidráulica.....	31
3.3.3.1.	Ensayo Duploedométrico.....	32
3.3.3.2.	Ensayo Pinhole.....	33
3.3.3.3.	Ensayo Crumb	34
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
4.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA	37
4.1.1.	Contenido de humedad.....	38
4.1.2.	Peso específico de sólidos	39
4.1.3.	Análisis granulométrico.....	40
4.1.4.	Límites de consistencia.....	44
4.1.5.	Clasificación expedita MCT	45
4.1.6.	Resumen de propiedades índice	46
4.2.	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA.....	47
4.2.1.	Potencial de Hidrógeno – pH	47
4.2.2.	Microscopía electrónica de barrido – SEM	49
4.2.3.	Difracción de rayos X.....	50
4.3.	CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA.....	52
4.3.1.	Ensayo duploedométrico	52

4.3.2.	Ensayo Pinhole	56
4.3.3.	Ensayo Crumb	59
5.	CONCLUSIONES	62
5.1.	CONSIDERACIONES FINALES DEL TRABAJO.....	62
5.2.	RECOMENDACIONES.....	65
5.3.	LIMITACIONES	66
6.	REFERENCIAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes principales de las fases de un suelo tropical.....	6
Figura 2. Estructura típica de los suelos colapsables.	9
Figura 3. Vista panorámica del sitio de estudio.....	11
Figura 4. Ubicación del Municipio de Guarne en el Departamento.	12
Figura 5. Imagen satelital de la zona de estudio.....	13
Figura 6. Localización geológica del sitio de estudio.	14
Figura 7. Fotografía panorámica del perfil analizado.	16
Figura 8. Perfil estratigráfico propuesto para el sitio de estudio.....	16
Figura 9. Estrato de suelo de interés para el estudio.	18
Figura 10. Muestra alterada de suelo.....	19
Figura 11. Extracción de muestra inalterada en campo.	20
Figura 12. Muestras inalteradas contaminadas.	22
Figura 13. Equipo usado para la prueba de Peso específico de sólidos.	24
Figura 14. Equipo usado para el Análisis granulométrico.	25
Figura 15. Equipo usado en la determinación de los Límites de Consistencia.	26
Figura 16. Gráfico de la Clasificación Expedita MCT.	27
Figura 17. Equipo usado para medir el pH de las muestras de suelo.	29
Figura 18. Equipo SEM-JSM-5910LP.....	30
Figura 19. Equipo X'Pert PRO MPD.....	31
Figura 20. Montaje para la ejecución del ensayo Duploedométrico.	33
Figura 21. Esquema del montaje usado para el ensayo Pinhole.	34
Figura 22. Guía para la valoración de la dispersión, en el ensayo Crumb.	36
Figura 24. Peso específico de sólidos de las muestras.	39
Figura 25. Curva granulométrica de la muestra natural.	40
Figura 26. Curva granulométrica de la muestra Jab.	41
Figura 27. Curva granulométrica de la muestra Gas.....	42
Figura 28. Comparación de granulometría Jab vs. Nat.....	42

Figura 29. Comparación de granulometría Gas vs. Nat.	43
Figura 30. Carta de Plasticidad de Casagrande.	44
Figura 31. Índice de actividad vs. Fracción fina.	45
Figura 32. Índice de actividad vs. pH (KCl).	48
Figura 33. Imagen SEM y análisis mineralógico muestra Nat.	49
Figura 34. Imagen SEM y análisis mineralógico muestra Jab.	49
Figura 35. Imagen SEM y análisis mineralógico muestra Gas.	49
Figura 36. Difractogramas de las muestras	51
Figura 37. Curva de compresibilidad. Muestra Nat.	54
Figura 38. Curva de compresibilidad. Muestra Jab vs. Muestra Nat.	54
Figura 39. Curva de compresibilidad. Muestra Gas vs. Muestra Nat.	55
Figura 40. Curva de compresibilidad. Muestra Nat-NS vs. Muestra Jab-S.	56
Figura 41. Curva Pinhole. Muestra Nat.	57
Figura 42. Curva Pinhole. Muestra Jab.	57
Figura 43. Curva Pinhole. Muestra Gas.	58
Figura 44. Comparativo de las Curvas Pinhole de todas las muestras.	59
Figura 45. Ensayo Crumb para especímenes secos al aire. t = 1 hora.	60
Figura 46. Ensayo Crumb para especímenes secos al horno. t = 1 hora.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de las sustancias utilizadas.	21
Tabla 2. Grupos de la clasificación MCT.	27
Tabla 3. Convenciones usadas como abreviaturas en los resultados.	37
Tabla 4. Contenido de humedad inicial para muestras objeto de estudio.	38
Tabla 5. Comparativo entre los sistemas de clasificación USCS y MCT.	46
Tabla 6. Resumen de propiedades índice.	47
Tabla 7. Mediciones de pH realizadas.	48
Tabla 8. Clasificación de la colapsibilidad para obras de ingeniería.	53
Tabla 9. Resumen de los ensayos duploedométricos.	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONSIDERACIONES INICIALES

Es bien conocido en el medio ingenieril que el desarrollo tanto de la mecánica de suelos, como de la geotecnia en general, se debe en gran parte a las investigaciones realizadas por académicos de países ubicados en zonas templadas, es por ello que los principios básicos de estas áreas de estudio son afines a los suelos predominantes en esas latitudes, básicamente depósitos sedimentarios recientes. Sin embargo, en el ambiente geotécnico de la zona intertropical se hallan grandes espesores de suelos residuales, producto de la meteorización *in situ* de los materiales, cuyo comportamiento no está plenamente estudiado en la teoría clásica. Es así como surgen importantes diferencias en los aspectos técnicos, que deben ser tenidas en cuenta en el ejercicio de la geotecnia, si se trata de suelos residuales tropicales.

Si bien es cierto que los comportamientos mecánico e hidráulico son independientes del tipo de suelo que se trate, la naturaleza del material define desde el tipo de exploración, hasta las suposiciones hechas por el ingeniero en sus análisis.

Las características y propiedades de los suelos residuales tropicales difieren de los suelos de las zonas templadas a tal punto que los sistemas de clasificación tradicionales (USCS, ASSHTO o HRB) a veces no son apropiados para la práctica de la geotecnia en este tipo de suelos. Estas diferencias surgen a partir de las estructuras, formadas durante el proceso de meteorización, y de las cuales depende el comportamiento y la adecuada clasificación de los materiales. Tales estructuras son entre otras cosas, muy sensibles ante la manipulación que se les dé, es decir, que durante las etapas de exploración y análisis en laboratorio podrían alterarse, lo que llevaría a resultados erróneos, y posteriormente a una caracterización inadecuada. Se vuelve muy importante entonces, el cuidado de las muestras, y de especial interés para controlar la variabilidad en los resultados, definir unas condiciones de humedad en los ensayos, acordes a las de campo, que representen efectivamente los niveles de precipitación y que permitan obtener unas propiedades índice reales, de las que partan buenos criterios de análisis.

Por otro lado, la contaminación de los suelos con hidrocarburos y detergentes es un problema que se presenta con frecuencia en diversos escenarios, tales como las estaciones de servicio y las zonas de lavado de vehículos. Estos agentes, al percolar en la masa de suelo producen daños y alteraciones irreversibles en las estructuras del mismo. Los efectos inmediatos pueden estar relacionados con la activación de características indeseables como la colapsabilidad o la erodabilidad, que en algunos casos son determinantes en la magnitud de la resistencia a las fuerzas de corte, y por tanto, en la estabilidad de las obras.

El problema de la contaminación del suelo ha recibido estudios por su alto nivel de impacto en los ecosistemas, por lo que ha sido un tema de múltiples investigaciones en el área de las ciencias ecológicas y ambientales. Pero en pocas ocasiones para propósitos ingenieriles, en especial geotécnicos.

Así pues, surge la idea de desarrollar este trabajo, como un acercamiento a las variaciones en las propiedades del suelo en virtud de dos agentes que alteran su naturaleza y que pueden, en el tiempo, definir diversas condiciones de los diseños geotécnicos, especialmente en un entorno tan particular como es este, en el que desarrollamos nuestra ingeniería.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Valorar el efecto del secado y la contaminación por hidrocarburos y detergentes en las propiedades de colapso y erodabilidad de un suelo residual tropical del Batolito Antioqueño, mediante la aplicación de pruebas de laboratorio que permitan estimar alteraciones en su comportamiento.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar física, química y mineralógicamente un suelo residual tropical, luego de someterle a diversas condiciones de secado y contaminación.
- ✓ Estudiar posibles cambios en la clasificación sistemática de un suelo como consecuencia del secado y los contaminantes.
- ✓ Identificar fenómenos como colapso y erodabilidad, que puedan desarrollarse en el suelo como producto de las alteraciones.
- ✓ Hacer recomendaciones respecto a las metodologías de ensayo adecuadas para clasificar correctamente un suelo residual tropical.
- ✓ Evaluar si el comportamiento del suelo ante el sistema de clasificación *USCS* corresponde con el estimado por medio de la metodología *MCT*.

1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Capítulo 1 – Se presenta una breve introducción, dedicada a la justificación del trabajo desarrollado y la definición de sus objetivos.

Capítulo 2 – Se hace una revisión bibliográfica específica, con el fin de recopilar y exhibir los conceptos básicos que motivan al desarrollo de este trabajo y que serán útiles posteriormente para su comprensión.

Capítulo 3 – Se describe la metodología usada a lo largo de las etapas de reconocimiento y exploración. La disposición y preparación de las muestras, y finalmente la etapa experimental, basada en los equipos y procedimientos sugeridos por la Normativa Internacional ASTM.

Capítulo 4 – En este capítulo se presentan los resultados de todas las pruebas de laboratorio desarrolladas a lo largo de la investigación, para las distintas condiciones del suelo que se desean evaluar, tanto en lo referente a las sustancias contaminantes, como en lo que respecta al secado.

Capítulo 5 – Se plasman las conclusiones del trabajo, y se hacen recomendaciones para el mejoramiento y la optimización de los diseños de obras ingenieriles afines a esta experiencia.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. METEORIZACIÓN TROPICAL

La meteorización de los minerales primarios en las regiones tropicales es más intensa y ocurre a profundidades mayores que en cualquier otra parte. La materia orgánica se degrada rápidamente y pocas veces es incorporada más abajo de una delgada capa superficial.

Consecuentemente, la meteorización ocurre principalmente por hidrólisis en condiciones cercanas a un *pH* neutro a profundidades muy por debajo de la influencia de los productos de descomposición ácida orgánica. La alteración frecuentemente es tan intensa que los materiales del suelo se comportan, en sentido geotécnico, de manera muy diferente a los materiales parentales de los que se derivan. Esto rara vez es cierto de los suelos menos alterados de las regiones templadas. (Fookes, 1997).

Los óxidos de hierro y aluminio y los óxidos hidratados liberados por la meteorización subsuperficial tropical no se disuelven tanto como en los ambientes de suelos más ácidos que caracterizan las regiones templadas y, consecuentemente, tienden a permanecer *in situ*.

El óxido de hierro se cristaliza como *hematita* ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) cuando el suelo se seca estacionalmente, o como *goetita* ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en un ambiente húmedo; la hematita le da al suelo un color rojizo, la *goetita* un color pardo u ocre. La *gibbsita* ($\gamma\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) es el principal óxido de aluminio que se forma durante la meteorización.

La *sílice* se pierde en solución o se combina con otros productos de la meteorización para formar minerales de arcilla tipo 2:1 (principalmente *caolinita*). Las bases (K, Na, Ca, Mg) se pierden en solución o se incorporan a los minerales de arcilla del tipo 2:1; la *caolinita* no recibe bases o lo hace en una cantidad muy baja. Los minerales 2:1 pueden migrar hacia abajo en el perfil como partículas de arcilla dispersas en suspensión (*lixiviación* o *eluviación*) para formar los horizontes superiores, con bajo contenido de arcilla, y los horizontes inferiores, con alto contenido de arcilla, pero los óxidos y los minerales de arcilla del tipo 1:1 son considerablemente menos susceptibles a este proceso. (Fookes, 1997).

2.2. SUELOS RESIDUALES TROPICALES (SRT)

El suelo residual está definido según (Hoyos, 2001), como aquel que se forma a partir de la meteorización *in situ* de una roca parental, lo que incluye la descomposición del material

preexistente y la lixiviación de los componentes solubles, dejando los materiales insolubles que no son transportados a distancias significativas

Los procesos de formación de los suelos residuales tropicales incluyen la incorporación del *humus* (vegetación en descomposición), la meteorización física y química, la lixiviación, el arrastre de materiales insolubles, la acumulación de residuos insolubles, el movimiento vertical de partículas finas y la alteración por la penetración de raíces, la excavación por animales, la caída libre y la desecación. Su acción individual, o conjunta, da lugar a una sucesión de horizontes más o menos diferenciados, aproximadamente paralelos a la superficie del terreno, que puede ser disconforme con la estructura de la roca. La secuencia de horizontes en cada sitio constituye el perfil del suelo. (Fookes, 1997).

Las capas de suelo cercanas a la superficie del terreno están fuertemente influenciadas por el *humus* y los ciclos de humedecimiento y secado y otros ciclos estacionales. Al aumentar la profundidad desaparece el contenido de materia orgánica y se reducen las fluctuaciones estacionales del contenido de humedad. En profundidad, el movimiento del agua es más lento, y se hace más difícil el transporte de las partículas finas y de los solutos a través del perfil del suelo. Consecuentemente, la mineralogía y la granulometría y, en particular, las propiedades geotécnicas pueden cambiar con la profundidad aunque el perfil completo se haya desarrollado a partir de una roca madre homogénea.

2.3. FASES DE UN SUELO RESIDUAL TROPICAL

En la mecánica de suelos clásica, el suelo es un sistema trifásico compuesto por sólidos, líquidos y gases. Contrariamente a lo expuesto con anterioridad, (Fredlund & Morgenstern, 1976), han propuesto una cuarta fase, considerando a la interfase entre el aire libre y el agua libre como una fase independiente. Aducen que esta interfase, formada por una película de escasas moléculas de espesor, tiene propiedades distintas de las del agua y el aire a las que separa. En su análisis de esfuerzos, dichos autores consideran que dos de las fases se equilibran bajo las presiones aplicadas (partículas sólidas y “membrana contráctil”) y las otras dos fases fluyen bajo las presiones aplicadas (aire y agua). Por otro lado, en las relaciones peso–volumen se considera el suelo como un sistema trifásico, incluyendo el peso de la membrana como parte del peso del agua y no considerando su volumen. En este trabajo se considera el suelo como un sistema trifásico compuesto por un esqueleto sólido, con poros rellenos de agua y aire, no considerando la influencia de la membrana “contráctil” de forma independiente.



Figura 1. Componentes principales de las fases de un suelo tropical.
(Fredlund & Rahardjo, 1996)

2.4. CONTENIDO DE HUMEDAD

Tradicionalmente, se define el contenido de humedad con base a la pérdida de masa del suelo, cuando éste se somete al secado para conseguir una masa constante a temperaturas entre 105°C y 110°C. A partir de este procedimiento es posible relacionar la cantidad de agua por unidad de masa de suelo, expresado en porcentaje. (Berry & Reid, 1993).

Según (Fredlund & Rahardjo, 1996), en algunos suelos tropicales existe cierta cantidad de agua de cristalización dentro de la estructura de los minerales, adicionalmente al *agua libre*, que puede ser removida a esa temperatura. Para identificar este tipo de suelo, deben ejecutarse ensayos comparativos sobre especímenes tomados de la misma muestra, registrando el contenido de humedad por secado hasta una masa constante entre 105°C y 110°C y a una temperatura que no supere los 50°C. Una diferencia significativa indica la presencia de *agua estructural* que no hace parte del agua, considerada en el sentido geotécnico corriente. En la mecánica de Suelos Tropicales y Parcialmente Saturados, se conoce esta particularidad como *agua de los microporos*.

2.5. SECADO DEL SUELO

Comúnmente, lo primero que se hace al recibir las muestras de suelo en laboratorio es proceder al secado y molido de las mismas. Este procedimiento resulta ser necesario para ciertas determinaciones, pero contraproducente para otras. Por ejemplo, la cantidad del nitrógeno soluble en agua incrementa con el tiempo y la temperatura de secado y se agudiza cuando es

sobresecado. Si hechos como estos se producen, se pierde carbono por oxidación de la materia orgánica. Del mismo modo, dependiendo del nivel original de potasio intercambiable, el potasio puede ser liberado o fijado. (Hesse, 1971)

En lo concerniente a los suelos ácidos, el secado al aire produce un incremento del fósforo soluble en agua o disminuye el fósforo soluble en ácido (generalmente KCl), y más aún si el suelo estudiado es secado a altas temperaturas, tal incremento puede ser cercano al ciento por ciento. Los suelos alcalinos al secarse, liberan menos fósforo, que al no ser sometidos a dicho proceso. Con algunos suelos, el secado puede afectar la capacidad de fijación de fósforo y ello está relacionado con cambios en el contenido de aluminio y hierro. Algunas muestras de suelo secadas al aire liberaron más sulfatos a las soluciones extractoras, que si fueran extraídas en fresco.

El pH de algunos tipos de suelo y particularmente, de aquellos que contienen compuestos sulfatados, puede sufrir cambios drásticos por el secado. Los suelos que contienen sulfuros o azufre elemental, cuando son secados al aire muestran pH menores hasta en dos unidades, mientras que en condiciones previas al secado son neutros. El efecto es químico y biológico, este último factor influye también al incrementar el manganeso intercambiable. Hasta en la determinación de textura, la deshidratación irreversible, causa tal cementación de las partículas arcillosas que no pueden ser dispersadas con posterioridad (Hesse, 1971), dando lugar a que se estimen granulometrías más gruesas de las que realmente la muestra contiene en condiciones de campo.

El secado en ocasiones se realiza al sol, sin embargo es recomendable realizarlo a la sombra ya que la temperatura alcanzada por el suelo en estas condiciones, puede provocar cambios importantes que afectan seriamente la validez de los resultados. Toda la influencia del secado y sus consecuencias en el comportamiento, son de especial interés en estudios edafológicos, pero en pocas ocasiones de aquellas investigaciones con propósitos ingenieriles.

2.6. CONSISTENCIA DEL SUELO Y PLASTICIDAD

Etimológicamente, consistencia equivale a capacidad de mantener las partes del conjunto integradas, es decir, estabilidad y coherencia. En mecánica de suelos, sólo se utiliza para los suelos finos que, dependiendo del contenido de agua y su mineralogía, fluyen sin romperse.

La plasticidad es la capacidad de experimentar deformaciones irreversibles sin romperse (Berry & Reid, 1993). Se presenta en la mayor parte de los suelos arcillosos con determinados rangos de humedad. El agua intersticial es el factor que más aporta al desarrollo de la plasticidad en el suelo, sin embargo no se conoce la manera exacta como lo hace.

Tradicionalmente, la consistencia de los suelos es evaluada mediante la metodología propuesta por Atterberg (1911) en la que se obtienen dos valores, *el límite líquido* y *el límite plástico*, que corresponden a contenidos de humedad, en función de los cuales es posible caracterizar el comportamiento de las partículas finas por medio de la *Carta de Plasticidad de Casagrande*, no obstante, esta clasificación puede ser mejorada, al incorporar el concepto de *actividad*, que según (Skempton, 1953) es una manera de relacionar en forma asertiva el grado de plasticidad que presenta un suelo, con el tipo y la cantidad de minerales arcillosos presentes. ($IP / \% < 5\mu m$).

Relacionado con la plasticidad, aparece el término *stiction*, que hace referencia a la cohesión entre las pequeñas partículas de arcilla, responsable de su consistencia. Por sus formas aplanadas y pequeños tamaños, la alta relación entre área y volumen de granos, y su proximidad, se generan fuerzas interpartículas que los ligan. Estas fuerzas eléctricas que explican la cohesión tipo *stiction* son varias: las fuerzas de *Van der Waal*, sumada a la acción de algunos cationes y a cargas asociadas al efecto borde-cara entre granos. Si un bloque de arcilla seca se pulveriza, desaparece la *stiction*: se requiere humedecer el polvo para que esta fuerza cohesiva al igual que la plasticidad reaparezcan.

2.7. SUELOS COLAPSABLES

Algunos tipos de suelos parcialmente saturados poseen un comportamiento inestable muy particular relacionado con una reducción considerable de su propio volumen. En la literatura geotécnica, muchos autores tratan acerca de los *suelos colapsables*, considerando factores intrínsecos a la propia naturaleza del suelo, como también factores relacionados al medio ambiente (lluvia, clima temperatura, humedad) y condiciones externas aplicadas (en especial acciones antrópicas).

(Cardoso, 1995), define los suelos colapsables como aquellos que cuando poseen un bajo contenido de humedad soportan bien las cargas. Pero al encontrarse en estado de saturación, sufren desmoronamiento brusco, dando lugar a una gran subsidencia.

(Moll, 1975), se refiere a los suelos colapsables como los que tienen macroporos, formados cuando las partículas finas presentan una estructura abierta que están unidos por coloides débiles, que los soportan por las fuerzas de succión y ante la acción de un incremento de carga, presentan una variación grande en su comportamiento tensión-deformación.

De una manera general, los suelos colapsables poseen una estructura altamente porosa, tienen una fábrica de textura abierta, que puede llegar a resistir esfuerzos razonablemente grandes para condiciones de no saturación, pero que presentan una disminución brusca de volumen,

debido al colapso de la estructura al ser saturados, aún para condiciones de esfuerzo relativamente bajas.

Otros mecanismos de colapso incluyen la pérdida de la influencia estabilizante de la tensión superficial en los meniscos de agua en los contactos entre partículas en suelos parcialmente saturados y la pérdida de capacidad de las mismas por el contenido excesivo de agua

Las regiones de clima tropical favorecen mucho la formación de este tipo de suelos. Se pueden desarrollar tanto en regiones que alternan entre estaciones secas y lluviosas, donde ocurre lixiviación de partículas finas cementantes de los horizontes superficiales hacia los más profundos, como también en las regiones áridas y semiáridas por la deficiencia de humedad.

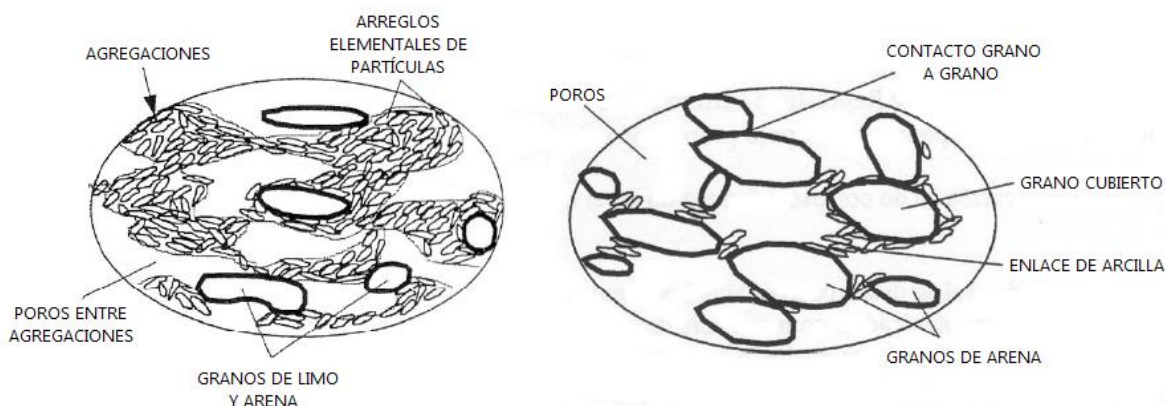


Figura 2. Estructura típica de los suelos colapsables.
(Tomado y modificado de (Da Silva, 2006). Recuperado el día 10 de Marzo de 2013).

2.8. SUELOS DISPERSIVOS

Los suelos dispersivos, en el sentido geotécnico de la palabra, son aquellos susceptibles a erosión interna y tubificación ante la presencia de agua relativamente pura. Cualquier suelo que contenga un alto porcentaje de sales intercambiables, puede ser dispersivo. (Camapum, 2006).

La principal diferencia entre las arcillas dispersivas y arcillas ordinarias resistentes a la erosión es la naturaleza de los cationes en el agua presente en los poros de la masa de arcilla. En las arcillas dispersivas predominan los cationes de sodio, mientras que en las arcillas ordinarias predominan los cationes de calcio, potasio y magnesio en el agua de poros. En consecuencia, este fenómeno químico es propio de suelos salinos

(Camapum, 2006), presenta el fenómeno de erosión interna, como un fenómeno de erosión subterránea en el cual la fuerza de infiltración del agua ocasiona la remoción de partículas al interior del suelo, formando cavidades en forma tubular, las cuales avanzan hacia el interior del suelo.

Este fenómeno, con el tiempo, lleva a la generación de canales que evolucionan en sentido contrario al del flujo del agua, pudiendo dar origen al colapso del terreno, los cuales provocan desprendimientos que agrandan las cárcavas o crean nuevos brazos. (Oliveira, 2005).

La erosión interna no es un fenómeno exclusivo de los taludes, donde se producen cárcavas, ésta también se puede generar a centenas de metros al interior de la masa de suelo, debilitando la estructura interna y generando regiones de infiltración preferencial. También, se propone que este fenómeno puede ser atribuido a antiguas galerías de hormigueros, cuyos vacíos favorecen la infiltración del agua y la dispersión de las partículas. (Camapum, 2006).

La erosión interna o el fenómeno de dispersión en el suelo como tal, puede ocurrir, al presentarse una de las siguientes condiciones:

- ✓ *La fuerza de infiltración sobrepasa la resistencia del suelo, generando la ruptura hidráulica.*
- ✓ *El gradiente hidráulico sobrepasa el gradiente crítico del suelo.*
- ✓ *La fracción gruesa del suelo no funciona como filtro para la fracción fina, generando el desplazamiento de esta última y propiciando la formación de grandes cavidades en la interior de los estratos o macizo.*

Los suelos residuales con características dispersivas incluyen aquellos con fracciones arcillosas compuestas principalmente de *esmeclita*, *vermiculita*, *haloisita* y algunas illitas, pero rara vez *caolinitas*. Los suelos dispersivos pueden encontrarse en regiones húmedas tanto como en las regiones áridas. (Fookes, 1997).

3. METODOLOGÍA

3.1. ETAPA DE EXPLORACIÓN

Dado que el objetivo primordial de este trabajo es la valoración que tienen diversas alteraciones, en el comportamiento de un suelo residual de la región, se selecciona como sitio de especial interés para este estudio un talud en suelo, que por las condiciones a las que se encuentra expuesto, hablando de clima, temperatura, intemperie y exposición a acciones antrópicas dentro de él, puede estar enmarcado de muy buena forma por la definición de suelo residual tropical anotada en el capítulo anterior.

Se visitó el sitio para hacer un reconocimiento visual y seleccionar el lugar más adecuado para la posterior toma de muestras. El recorrido se llevó a cabo en días de precipitaciones medias a altas, se observó la formación de surcos y superficies lavadas por la escorrentía, favorecida por la pendiente natural del terreno y la ausencia de cobertura vegetal, esto debido a que este sitio anteriormente fue usado para la extracción de material de préstamo para terraplenes, según anotaron varios habitantes de las zonas aledañas.

La Figura 3. es una fotografía en la que se puede ver de manera general el lugar.



Figura 3. Vista panorámica del sitio de estudio.

3.1.1. Ubicación del Sitio

El sitio de estudio se encuentra localizado en la margen derecha de la autopista Medellín-Bogotá, en vecindades del retorno 6, a 21 kilómetros de Medellín cerca de la cabecera del municipio de Guarne.

Guarne es un municipio que está ubicado al Este del Departamento de Antioquia, en la región Centro Andina Colombiana, cercano de la Ciudad de Medellín. Separado del Valle de Aburrá por una gran colina, donde nace la quebrada La Mosca que pasa bordeando la zona urbana y desemboca en el río Negro. Sus alturas varían entre los 1800 msnm y los 2400 msnm, y se caracterizan por la presencia de pequeñas colinas, que a pesar de dar origen a pendientes relativamente suaves, son suficientes para numerosas fuentes hídricas que bañan toda la zona.

Geográficamente zona de estudio se encuentra a 6° 17' 37.30" de Latitud Norte, y de 75° 27' 02.28" de Longitud Oeste, con una cota de 2153 msnm. Guarne presenta una temperatura media según el IDEAM (2013) de 17°C, y precipitaciones de 1800 mm a 2500 mm anuales. Una zona caracterizada por vientos de altas velocidades que convergen al Valle de San Nicolás, y una humedad relativa alta que oscila alrededor del 92%.

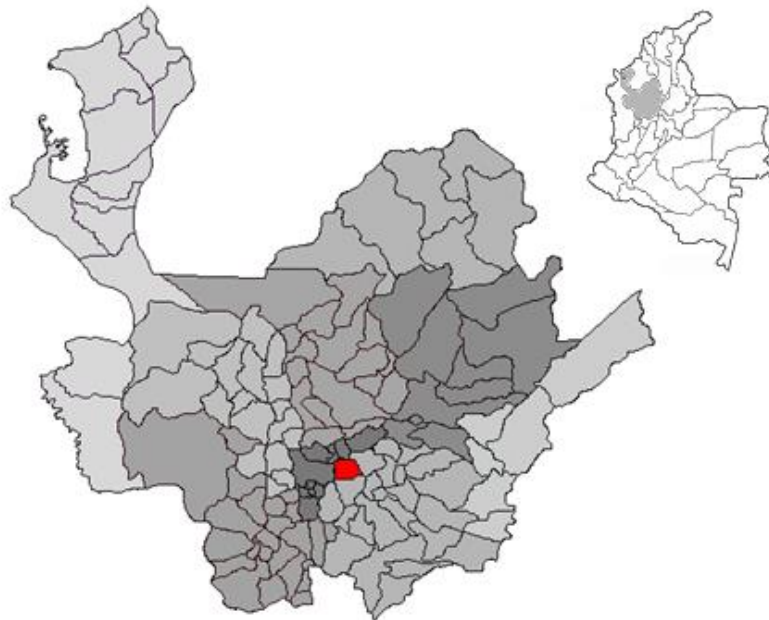


Figura 4. Ubicación del Municipio de Guarne en el Departamento.
(Tomado y modificado (Municipio de Guarne, 2007). Disponible en <http://www.guarne-antioquia.gov.co> Recuperado el día 13 de Marzo de 2013).



Figura 5. Imagen satelital de la zona de estudio.
(Tomada y modificada (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2011). Disponible en <http://www.igac.gov.co>. Recuperada el día 15 de Marzo de 2013).

3.1.2. Geología Regional

Las rocas del Batolito Antioqueño y los procesos de meteorización y erosión que sobre ellas han actuado generan geoformas de semicolinas redondeadas de poca altura, donde los agentes de transporte del material, modelan el paisaje y contribuyen a formar vertientes cortas en valles estrechos, con drenaje dendrítico como respuesta a los procesos de escorrentía. Esto permite encontrar el material saprolítico profundo expuesto en superficie que luego es fácilmente removilizado por procesos erosivos. (Feininger, 1985).

Además de los suelos derivados de la cuarzdiorita, se encuentran depósitos aluviales con algunas terrazas de poca altura y valles asociados a drenajes naturales de poca longitud donde los procesos de sedimentación han sido favorecidos por una disminución del gradiente hidráulico y eventos eólicos. Estas geoformas se encuentran a lo largo de los drenajes activos y morfológicamente presentan superficies planas con poca inclinación y localmente fuertemente disectadas.

La región de los valles de Rionegro, Guarne, Marinilla, San Vicente, El Peñol y Guatapé entre las cotas 2.200 y 1.950 msnm (embalse El Peñol), presenta colinas con sus superficies convexas, semejantes a domos de poca altura, disectadas por un drenaje semidendrítico, localmente modificado por la acción antrópica que produce deterioro en el paisaje en los canales naturales.

En estas colinas no se ha desarrollado la meteorización profunda de las rocas del Batolito Antioqueño característica en otras regiones.

Son relativamente escasos los afloramientos del Batolito Antioqueño y la mayor parte del área donde aflora está cubierta por un suelo arcilloso y saprolito arenoso, formados por procesos de meteorización física y química bajo la influencia del clima, la vegetación y la acción antrópica que en muchos casos ha acelerado el proceso debido a la tala del bosque primario para el desarrollo agropecuario y urbanístico de la región; además, las características físicas del macizo rocoso, tales como el fracturamiento, diaclasamiento y presencia de zonas de cizalladura, así como el empaquetamiento de los cristales facilitan el acceso de los agentes de meteorización, especialmente el agua, y por lo tanto el debilitamiento de la estructura de la roca acelerando el proceso de meteorización. (Feininger, 1985).

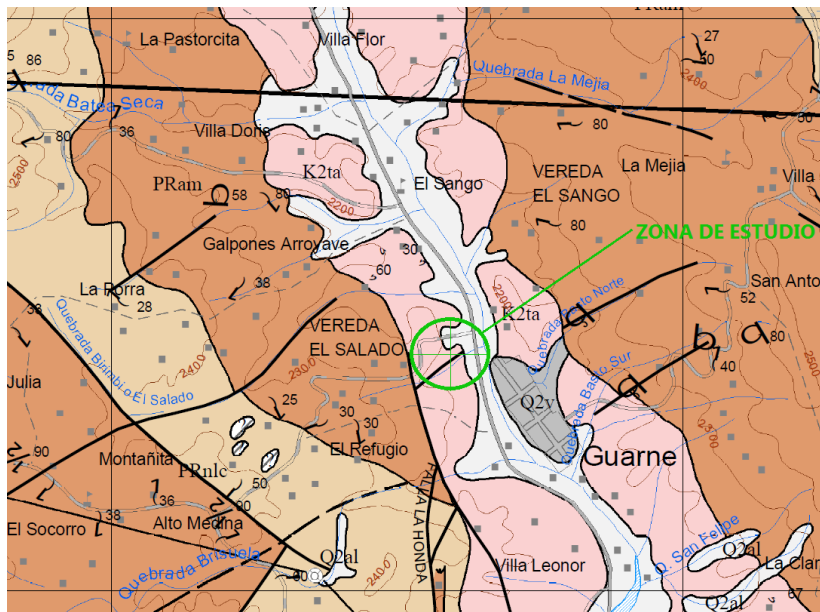


Figura 6. Localización geológica del sitio de estudio.

(Tomada y modificada de *Plancha N° 147 - Ocurrencias Minerales en el Noreste Antioqueño* (Instituto Nacional de Geología y Minas, 2007). Recuperado el día 16 de Marzo de 2013).

La baja resistencia a la alteración de las rocas de Batolito Antioqueño origina un perfil de meteorización muy profundo, 10 a 50 metros, donde es común encontrar bloques esféricos residuales parcialmente meteorizados, constituidos por gravas y arenas y que en conjunto forman un paisaje de colinas subredondeadas de baja altura. La meteorización de las rocas del Batolito Antioqueño, se inicia con la alteración de la biotita que libera el hierro al reaccionar con el agua meteórica, formándose una corona de hidróxidos de hierro insolubles alrededor del mineral primario y tomando un color violeta a granate, los feldespatos alcalinos y la plagioclasa se alteran

a arcillas y toman un color crema amarillo, mientras que el cuarzo no sufre alteración y se concentra como riegos en el suelo residual.

El saprolito actual que cubre gran parte de los afloramientos del Batolito Antioqueño, está constituido por feldespatos caolinizados, láminas finas de biotita y ocasionalmente de moscovita, algunos cristales de hornblenda y granos de cuarzo sacaroidal de color blanco a gris. A pesar del avanzado estado de meteorización, el saprolito conserva en gran parte, la estructura ígnea fanerítica granular de la roca original, con un color moteado blanco a crema de cuarzo – feldespato y rojizo en diferentes tonalidades. (Feininger, 1985).

Las diferencias en la coloración del saprolito obedecen a:

- ✓ Zonas de color claro, blanco a amarillo claro, corresponden a rocas más ricas en feldespatos y cuarzo y menor proporción de ferromagnesianos donde predomina el proceso de caolinización de los feldespatos.
- ✓ Zonas de color claro con abundantes fracciones gruesas de cuarzo: diques pegmatíticos a aplíticos de espesor centimétrico que cortan la roca original.
- ✓ Zonas de color vino tinto, violeta a granate: Mayor abundancia de minerales ferromagnesianos transformados a óxidos e hidróxidos de hierro, generando películas que manchan o cubren el resto de los minerales, estas zonas son por lo general más arcillosas y contienen menor cantidad de cuarzo residual.

3.1.3. Perfil de meteorización del sitio de estudio

Con base en el análisis desarrollado en la etapa de exploración, que incluyó reconocimiento manual y visual en el sitio, facilitado por la verticalidad del talud expuesto que permite observar con detalle cada horizonte, y la posterior descripción de materiales en laboratorio, por medio de la metodología enunciada en la norma ASTM D-2488-09, se procede a proponer un perfil estratigráfico para la cara expuesta del talud del sitio en que se desarrollará este trabajo.

Se describen todos los horizontes hallados en el talud, aunque para fines de la investigación, y dado su alcance, sólo se trabajará con uno de ellos



Figura 7. Fotografía panorámica del perfil analizado.

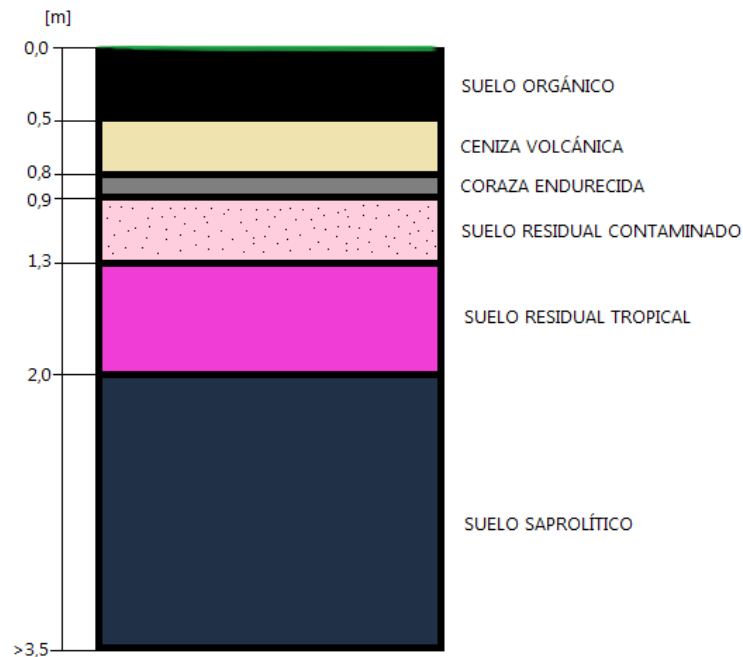


Figura 8. Perfil estratigráfico propuesto para el sitio de estudio.

Suelo orgánico – Es un suelo de color café oscuro con vetas de color pardo, de consistencia semiblanda, con alto contenido de humedad, que presenta baja plasticidad, con alta presencia de materia orgánica en descomposición, con un olor característico de los *organosoles*.

Ceniza Volcánica – Es un suelo arcilloso de color café pardo a grisáceo, con vetas de color crema, con un contenido de humedad entre medio y alto, de alta plasticidad, de consistencia blanda, con presencia de cristales de cuarzo de pequeñas dimensiones.

Coraza endurecida – Se trata de una capa de suelo de color naranja, con vetas de color gris, con motas de color café rojizo, cementada por procesos cuasi superficiales, con presencia de óxidos de hierro y sedimentos sueltos, con un contenido de humedad entre medio y alto, de plasticidad nula, de consistencia firme y de textura arenosa al tacto.

Suelo residual contaminado – Es un suelo finogranular limo-arcilloso, de color naranja, con vetas de color café pardo, con un contenido de humedad entre medio y alto, de consistencia semiblanda, de plasticidad media, con evidencia de ceniza volcánica, con total ausencia de estructura y con presencia de fragmentos de cuarzo de pequeñas dimensiones.

Suelo residual tropical – Se trata de un suelo finogranular limo-arcilloso, de color café rojizo, con vetas de color naranja, con un contenido de humedad entre medio y alto, de plasticidad baja, de consistencia firme, con ausencia total de estructura y de textura arenosa al tacto.

Suelo saprolítico – Es un suelo limo-arenoso, de color café rojizo, con vetas de color blanco y naranja, con motas de color negro, con un contenido de humedad medio, de plasticidad baja a nula, de consistencia firme, poco cohesivo, con presencia de fragmentos de cuarzo y evidencia de la estructura parental.

3.1.4. Estrato de suelo estudiado

El estrato de suelo seleccionado como objeto de este trabajo es aquel que se cita en la descripción del perfil de meteorización como Suelo residual tropical. Es una capa de aproximadamente 0,6 m de espesor, proveniente de la descomposición del Suelo saprolítico que lo subyace, debido a que el grado de exposición en esta zona del talud es mayor ante las precipitaciones y los cambios de temperatura propios del sector, a lo largo del ciclo meteorológico diario.

La cobertura de color negro que presenta el talud en superficie se debe a las bajas temperaturas que se presentan en la noche que sumadas a la humedad relativa en el ambiente dan origen al fenómeno conocido como *helada*, que según (Iribarne & Godson, 1973), es un evento atmosférico que en ocasiones puede ser tan fuerte que no afecta sólo a la vegetación, sino incluso a la masa de suelo circundante, más en este caso cuando la cara frontal del talud está expuesta. Esa capa quemada por la helada no se considera para los análisis dado que sus alteraciones pueden ser de tipo biológico y están por fuera del propósito geotécnico de este trabajo.



Figura 9. Estrato de suelo de interés para el estudio.

Se estima que las tonalidades en la gama de rojo a naranja pueden ser evidencia de óxidos de hierro que se han desarrollado a partir del alto grado de meteorización al que ha llegado el suelo en su evolución histórica.

Tratándose de un suelo con orígenes en el Batolito Antioqueño es normal la presencia de minerales arcillosos sensibles ante la *meteorización química* como la *Gibbsita*, sin embargo también se pueden identificar minerales persistentes en el tiempo como el *Cuarzo*, que en forma de pequeños cristales subangulosos le dan una textura arenosa.

En la parte superior de este estrato se encuentra una capa del mismo, contaminada con ceniza volcánica que se ha lavado por eluviación. Esta fracción contaminada puede presentar características que no son propias de los suelos residuales tropicales, justamente por la naturaleza de suelo transportado de las cenizas. Subyaciendo el suelo residual se encuentra el saprolito del que éste proviene, bajo condiciones de alteración mayores.

De esta manera entonces, es presentado el horizonte estratigráfico que será objeto de todos los análisis cuantitativos y cualitativos desarrollados a lo largo del presente trabajo, como un suelo residual tropical originado a partir de la meteorización de unos de los afloramientos del Batolito Antioqueño en la región del Oriente Cercano del Departamento de Antioquia.

3.1.5. Recolección de muestras

Se tomaron muestras alteradas, extraídas manualmente y almacenadas en bolsas de plástico, las cuales son capaces de reducir hasta en un 80% las posibles alteraciones en el contenido de humedad por exposición al ambiente. Se cuidó especialmente, el no incluir partículas de materia orgánica, ya que éstas no son propias de este horizonte de suelo, enunciado bajo las condiciones de la sección anterior de este texto.



Figura 10. Muestra alterada de suelo.

En lo referente a las muestras inalteradas, pensando en la posterior adición de las sustancias contaminantes, éstas fueron tomadas con el mismo criterio que una muestra de cajón tradicional, según la metodología descrita en la norma ASTM-D4220, pero con sección circular, es decir, un espécimen cilíndrico de gran tamaño, contenido en un recipiente de la misma forma, en este caso una caneca plástica, para evitar la absorción de los contaminantes y poderles dejar en reposo un tiempo prudente sin alterar las condiciones de humedad del sitio.



Figura 11. Extracción de muestra inalterada en campo.

De este tipo de muestras, fueron recuperadas tres, dos destinadas para los contaminantes y una para el trabajo en condiciones naturales. Las muestras fueron transportadas cuidadosamente y dispuestas en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Minas, para la siguiente etapa del trabajo.

3.2. ADICIÓN DE CONTAMINANTES

Teniendo dispuestas las muestras inalteradas en los recipientes cilíndricos, el procedimiento que se desarrolló a continuación fue la adición de los contaminantes propuestos para alterar las condiciones iniciales del suelo.

La cantidad de contaminante a adicionar se determinó bajo hipótesis similares a las usadas por (Valencia, 2009), que hablan de llenar el 60% de los vacíos con aire de la muestra con el agente contaminante, dejándolo actuar durante 10 días, lapso de tiempo en que los recipientes permanecieron sellados para evitar la pérdida de humedad, de modo que transcurrido dicho periodo de tiempo, la porción de agua mezclada con el respectivo agente sea equivalente, en términos de saturación, a lo hallado en el sitio donde fueron tomadas las muestras.

Los contaminantes fueron adicionados a la muestra por goteo rápido y uniforme sobre toda la superficie, de modo que al percolar en la masa de suelo, ésta quedara saturada en la mayor cantidad posible, lo que además pudo garantizarse por la buena permeabilidad y la disposición

vertical de los especímenes cilíndricos. Sin embargo, se tuvo cuidado en no favorecer el flujo de los líquidos estando en contacto con las paredes del recipiente, pues esto ocasionaría una incertidumbre grande en lo concerniente a la cantidad de contaminante absorbido realmente por el suelo.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de las sustancias utilizadas.

Sustancia	pH	Densidad Relativa (20°C)	Viscosidad [cP]	Tensión superficial [mN.m ⁻¹]
Agua destilada	6,8	1,00	1,14	72,30
Agua-Jabón	7,9	1,05	1,32	65,81
Gasolina	7,3	0,72	0,62	35,26

3.2.1. Solución Agua-Jabón

Corresponde a una mezcla de agua destilada y jabón, con una concentración de 1:10, es decir, una parte de jabón por cada diez partes de agua destilada.

Con este contaminante se pretende simular básicamente dos condiciones. La primera de ellas es la infiltración de sustancias de características similares en las zonas de lavado de vehículos, en las que superficialmente se disponen capas de gravas para evitar el empozamiento del agua ya usada, lo que favorece altamente la permeabilidad y hace que éstos líquidos alcancen los estratos inferiores.

La segunda condición corresponde a los sistemas de evacuación de aguas domésticas servidas implementados en las zonas rurales, que no es más que un tubo colector que deposita el agua en la parte posterior de las viviendas y permite que por escorrentía ésta se deposite en los cauces naturales, lo que no es del todo válido, ya que gran parte tiende a percolar en la masa de suelo, y puede dar pie a comportamientos no estudiados hasta ahora.

En cuanto al jabón usado para la solución, es un detergente líquido comercial de uso doméstico, compuesto principalmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$) y ácido sulfónico (CH_3SO_2OH), sustancias que a pesar de no tener una estructura atómica muy compleja, es difícil estimar el tipo de reacción que tendrá al contacto con el suelo, y en especial en los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, como sus componentes más sensibles.

Se usó un detergente líquido en lugar de uno en polvo, para buscar mayor facilidad al homogenizar la mezcla y evitar taponar los pequeños poros del suelo.

3.2.2. Gasolina

El problema que se busca representar con la adición de gasolina es el del almacenamiento de combustibles, que eventualmente presenta fugas o derrames, que producen lixiviación de los hidrocarburos en el suelo, alterando sus características físico-químicas y dando origen a problemas en el comportamiento geotécnico del mismo.

La gasolina usada para este trabajo es de tipo *Corriente* proveniente del complejo de Barrancabermeja, que es una mezcla donde puede haber de 200 a 300 hidrocarburos distintos, formada por fracciones combustibles provenientes de diferentes procesos de refinación del petróleo.



Figura 12. Muestras inalteradas contaminadas.

3.3. ETAPA EXPERIMENTAL

La etapa experimental de este trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Minas, donde se llevaron a cabo pruebas para Caracterización física, Caracterización química y mineralógica, y Caracterización Hidráulica, compuesta por Ensayos de colapso y Ensayos de Erodabilidad, basados en metodologías de *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.

3.3.1. Caracterización física

Para la caracterización física del suelo estudiado tanto en estado natural, como en estado alterado con cada uno de los contaminantes, se desarrollaron los ensayos descritos a continuación.

3.3.1.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo se determinó por medio del método del horno, contemplado en la norma ASTM-D2479. Este método se basa en la diferencia de peso determinado entre el suelo en condiciones naturales y posteriormente seco al horno, durante un mínimo de 16 horas. La temperatura de secado debe ser de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.3.1.2. Peso específico de sólidos

El peso específico de sólidos es una propiedad que relaciona el peso unitario de las partículas, con respecto al peso unitario del agua a 20°C , éste depende de la composición mineral del suelo. Es muy importante conocer este dato a la hora de determinar valores como la relación de vacíos, el grado de saturación y la porosidad de la muestra.

Fue determinado por medio del método del picnómetro con agua, descrito en la norma ASTM-D854. En esta norma se describen dos procedimientos, uno denominado A para suelos ensayados en condiciones de humedad natural, y uno B, para especímenes secos al horno. Vale la pena aclarar que allí se destaca el procedimiento A, como más adecuado para suelos de características tropicales. Sin embargo, se evalúa el comportamiento por el método B, con el fin de estimar la sensibilidad de esta propiedad ante el secado de suelo.

Básicamente, consiste en la disposición de la muestra en un picnómetro calibrado hasta determinado volumen, con agua destilada, para proceder a la extracción del aire, que en este caso se hizo por medio de una bomba generadora de vacío. Posteriormente, y basado en el dato del recipiente lleno sólo con agua, se estima el volumen real del suelo, pesado al inicio del ensayo.



Figura 13. Equipo usado para la prueba de Peso específico de sólidos.

3.3.1.3. Análisis Granulométrico

Por medio del análisis granulométrico se busca determinar los tamaños de las partículas que conforman el suelo ensayado. El método está descrito en las normas ASTM-D422 y ASTM-D4221.

Se basa en la disposición de tamices de diámetros distintos, en orden descendente, de modo que en cada uno quede retenida la fracción asociada a dicho tamaño.

Para la fracción más fina se procede con un ensayo de sedimentación, utilizando un *Hidrómetro*, también descrito en la norma ya mencionada, con la variación que fue desarrollado dos veces para cada muestra. Una en condiciones estándar, y otra adicionándole hexametáfosfato de sodio, una solución defloculante que contribuye a la desagregación de las partículas, para la correcta estimación de su tamaño.



Figura 14. Equipo usado para el Análisis granulométrico.

3.3.1.4. Límites de consistencia

Para determinar los contenidos de humedad correspondientes al Límite Líquido y al Límite Plástico, se acogieron las especificaciones descritas en la Normativa ASTM-D4318.

La diferencia entre estos dos límites proporciona el índice de plasticidad, un resultado muy útil para la identificación y clasificación. También, para el cálculo del parámetro de *Actividad*, que en el caso de los suelos residuales tropicales puede llegar a ser más adecuado para categorizarlo.

El ensayo de Límite Líquido consiste en lograr que una muestra de suelo dispuesta en el aparato de Casagrande, logre cerrar una ranura de aproximadamente 12 mm en exactamente 25 golpes. Para tal fin, la norma ASTM sugiere estimar la humedad necesaria para obtener cantidades de golpes entre 6 y 35, y posteriormente conseguir el valor de 25 mediante un ajuste lineal.

Con la prueba de Límite Plástico se busca determinar el contenido de humedad al cual el suelo comienza a resquebrajarse, cuando se modela por rodamiento, entre la palma de la mano y una superficie lisa y plana, un pequeño cilindro del suelo de 3 mm de diámetro aproximado.

Es muy importante aclarar que estas pruebas son realizadas sobre muestras remoldeadas, y por tanto no puede esperarse que reflejen las características del comportamiento geotécnico, que depende de la macro estructura natural propia del suelo residual.



Figura 15. Equipo usado en la determinación de los Límites de Consistencia.

3.3.1.5. Clasificación expedita MCT

La clasificación MCT no está basada en las propiedades índice (límites de Atterberg, distribución granulométrica) como si lo hacen las clasificaciones tradicionales.

Con el fin de simplificar los procedimientos necesarios para la clasificación geotécnica de los suelos, utilizando menor cantidad de muestra y un equipamiento más simple, y llegar a resultados acordes al comportamiento real de los suelos residuales tropicales, se desarrolló un procedimiento denominado MCT Expedito o Método de las Pastillas propuesto por (Nogami & Villibor, 1994).

El ensayo consiste en el moldeo de especímenes de prueba de forma cilíndrica, en un anillo de PVC con dimensiones de 20 mm de diámetro y 5 mm de altura, y tomar las mediciones correspondientes a contracción y penetración.

Éste procedimiento da valores de contracción diametral y penetración después de la absorción de agua de especímenes de suelo, que posteriormente se grafican en una tabla, a partir de la cual es posible enmarcar el suelo en uno de siete grupos, cuyos comportamientos están definidos en la literatura

Tabla 2. Grupos de la clasificación MCT. (Nogami & Villibor, 1994).

Grupo de clasificación MCT	Descripción
LG'	Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas
LA'	Arenas arcillosas lateríticas
LA	Arenas con poca arcilla laterítica
NG'	Arcillas, arcillas limosas y arcillas arenosas no lateríticas
NS'	Limos caoliníticos y micáceos, limos arenosos y limos arcillosos no-lateríticos
NA'	Arenas limosas y arenas arcillosas no-lateríticas
NA'	Arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no-lateríticos

La metodología de ensayo usada es la siguiente:

La fracción de suelo que pasa el tamiz No. 40 es humedecida y espatulada. Se moldean pastillas en anillos de 20 mm de diámetro y 5mm de altura y se llevan a secar a 60°C durante 24 horas. Después del secado, se mide la contracción de las pastillas por la variación en su diámetro. Los anillos son rehumedecidos en placa porosa saturada durante dos horas. Se observa la expansión, la fisuración y el debilitamiento. Este último es evaluado por la penetración de una punta de acero de diámetro de 1,25 mm y una masa de 10 g que se deja caer libremente desde aproximadamente 10 cm sobre la pastilla saturada.

En virtud de este procedimiento se obtienen dos valores característicos del suelo, que son la contracción diametral y la penetración, con los que se puede dar una clasificación bastante adecuada de éste.

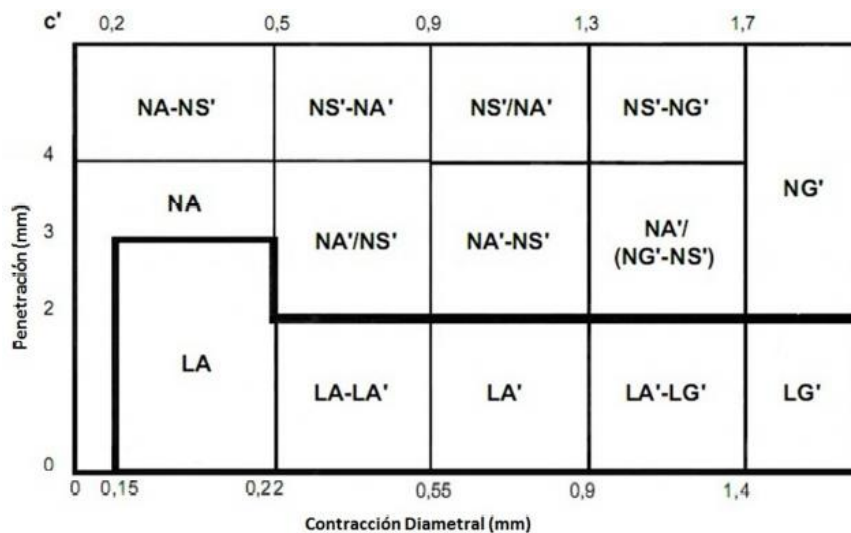


Figura 16. Gráfico de la Clasificación Expedita MCT. (Nogami & Villibor, 1995)

3.3.2. Caracterización química y mineralógica

El conocimiento de algunas propiedades químicas del suelo, se torna importante cuando se trata del estudio de la interacción del mismo con sustancias líquidas de naturaleza química considerada agresiva. Para evaluar la posible influencia de los contaminantes, se realizan estos ensayos tanto para los especímenes naturales, como para los alterados.

3.3.2.1. Potencial de Hidrógeno – pH

El potencial de hidrógeno es un parámetro indicador de la acidez de una sustancia, la cual es estimada por medio de la cantidad de iones de hidronio (H_3O^+) presentes. Es una propiedad que depende de la temperatura de la solución. Se mide en un rango de 0 - 14, donde el valor de 7 se considera neutro, siendo teóricamente el pH del agua. (Sposito, 1981).

Generalmente es medido en soluciones, y en este caso por tratarse de partículas sólidas de suelo, éstas deben ser disueltas en una concentración 1:10 con dos agentes disolventes. El primero de ellos es el agua destilada y el segundo es el Cloruro de Potasio (KCl).

La metodología empleada se encuentra descrita en la normativa ASTM-D4972, de la que se usa el denominado *Método A*, es decir, aquel que realiza las mediciones no en rangos, sino en valores exactos con una precisión de 0,02 unidades pH, por medio de un pH-metro, que no es más que una consola de lectura, a la que son adaptados dos sensores, uno para temperatura y otro para el pH propiamente. Este equipo es calibrado previo a todas las mediciones por medio de dos sustancias de pH conocido, llamadas *Buffers*, con las cuales es posible controlar la precisión de las lecturas posteriores.

Es de especial interés, para propósitos geotécnicos, trabajar con la diferencia de las medidas hechas para un mismo soluto, en las dos sustancias disolventes ya mencionadas. Así:

$$\Delta pH = pH(KCl) - pH(H_2O)$$

Según (Kiehl, 1979), un valor de ΔpH negativo indica que la muestra es predominantemente constituida por arcillominerales, mientras que un ΔpH positivo asociado con el predominio de óxido de hierro y de aluminio. Según el mismo autor, cuando el ΔpH es negativo, indica que la cantidad de aluminio intercambiable es alta, y cuando es positiva, esta cantidad es baja. Por consiguiente, la determinación de ΔpH indica si el aluminio es en su mayoría en forma intercambiable o no intercambiable.



Figura 17. Equipo usado para medir el pH de las muestras de suelo.

3.3.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido – SEM

La microestructura como se ha mencionado ya anteriormente, es de gran importancia para el análisis de este tipo de suelos. El microscopio electrónico de barrido es una herramienta bastante útil y muy utilizada en el área de la geotecnia para estudios de colapsabilidad y dispersión. Este equipo permite conocer el arreglo estructural del suelo, tamaño y disposición de partículas ante la eventual presencia de arcillo-minerales. En general el aparato, se usa para observar pequeñas muestras en alta resolución, identificando tamaños de hasta $3 \mu\text{m}$, con una excelente profundidad de foco, lo que torna sus imágenes con aspecto tridimensional. (Cardoso, 1995)

El microscopio cuenta con una sonda, que es una punta metálica afilada, que puede tener un grosor de un solo átomo, y que se coloca a una distancia entre 50 y 200 *Angstroms* de la superficie del material, para luego aplicar un voltaje de 1 a 30 kV entre ellos. A causa de la poca distancia entre el material y la sonda, algunos electrones se escapan a través del orificio, generando una corriente cuya magnitud es mayor cuando la sonda se acerca a la superficie y disminuye cuando se aleja.

A medida que el mecanismo de barrido desplaza la sonda por encima de la superficie, se ajusta de modo automático la altura de la sonda para mantener constante la corriente, lo que permite esbozar las ondulaciones de la superficie. (Cardoso, 1995)

Después de sucesivas barridas en todas direcciones, se utiliza una computadora para crear una representación tridimensional del material.

Cuenta además, con un analizador de espectro de rayos X, que puede canalizar los haces de luz de alta energía que produce el objeto al ser bombardeado con electrones. Dado que la identidad de los diferentes átomos y moléculas de un material se puede conocer utilizando sus emisiones de rayos X, no sólo proporciona una imagen ampliada, sino que suministra también información sobre la composición química del material.

Para que la superficie pueda conducir la electricidad, ella debe ser recubierta con una fina película metálica. En este caso se usó una capa de oro.



Figura 18. Equipo SEM-JSM-5910LP. Laboratorio de microscopía avanzada, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

3.3.2.3. Difracción de rayos X

Es un ensayo que se realiza para identificar los minerales presentes en el suelo, puesto que la caracterización de las partículas y sus formas, no son posibles ante el ojo humano. Es utilizada también, para determinar la estructura interna que constituye la fracción arcillosa y otros componentes finogranulares. Un análisis difractométrico comprende tres etapas: preparación, análisis e interpretación. Estos procedimientos están descritos a continuación, según (Guimaraes, 1999).

La preparación inicia con la separación granulométrica por tamaño de las partículas. La fracción de arcilla, la cual puede presentar óxidos e hidróxidos, es separada por lavado o por trituración mecánica. Luego de esto la muestra es mantenida en reposo por lo menos 12 horas. Después de

esto la arcilla es preparada como una pasta sobre láminas, espatulada con movimientos repetidos en una misma dirección, y se deja secar.

Para la identificación de los arcillominerales es necesario aplicar una temperatura de 490°C durante 3,5 horas, mientras esto es recomendable definir los picos esperados en el difractograma correspondientes a los minerales que se estima que hacen parte de la fracción evaluada.

Después de esta preparación, la muestra es analizada en el difractómetro de rayos X. con una velocidad de aproximadamente 2°/minuto. El laboratorio de caracterización de materiales de la Facultad de Minas cuenta con un equipo marca Panalytical referencia X'Pert PRO MPD con ánodo de Cu y filtro de Ni, dotado con una cámara de temperatura para la realización de pruebas hasta los 1600°C y un software para la adquisición de datos y generación de los difractogramas. (Guimaraes, 1999).



Figura 19. Equipo X'Pert PRO MPD. Laboratorio de caracterización de materiales, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

3.3.3. Caracterización hidráulica

La caracterización hidráulica del suelo corresponde al comportamiento que éste presenta al interactuar en el medio con el agua, lo que puede activar algunas propiedades indeseables en la geotecnia, como son el colapso y la erosión interna o dispersión. El objetivo de esta serie de ensayos es evaluar la sensibilidad del suelo estudiado ante estos fenómenos, y posible influencia de los contaminantes adicionados.

3.3.3.1. Ensayo Duploedométrico

Debido a los grandes problemas que pueden ser ocasionados por la ocurrencia del proceso de colapso en un determinado suelo, es muy importante estar en capacidad de evaluar y valorar la magnitud de este fenómeno.

Los métodos de laboratorio usados para cuantificar el colapso, van desde aquellos que proveen resultados indirectos que se pueden correlacionar, hasta los que están basados en estados de tensión y niveles de deformación. A este último grupo pertenece el *Ensayo Duploedométrico*, el cual consta de la ejecución en paralelo de dos ensayos edométricos o de consolidación, que son desarrollados para muestras del mismo suelo, uno en condiciones de humedad natural y otro con la muestra completamente saturada.

Ambos ensayos se desarrollan siguiendo las directrices descritas en la norma ASTM-D2435, que corresponde al ensayo de consolidación unidimensional, es decir el ensayo edométrico tradicional, y la norma ASTM-D5333 en la que se describe el procedimiento de medida del Potencial de Colapso.

La preparación de los especímenes comienza con la extracción de un bloque cilíndrico desde uno de los recipientes en que fueron tomadas las muestras en campo. El diámetro de dicho bloque debe ser un tanto mayor que el del anillo de aluminio en que se dispone el suelo a ensayar, de modo que con reducciones graduales se vaya ajustando. Estas reducciones no deben crear una superficie cristalizada que altere las condiciones de permeabilidad.

Una vez el espécimen está colocado dentro del anillo, se procede al montaje en la cámara edométrica, ubicando en las superficies expuestas dos trozos de papel filtro con iguales dimensiones, que encajen perfectamente y eviten el contacto directo del suelo con las piedras porosas, pero sin perturbar la condición de drenaje a dos caras, con que se plantea teóricamente el ensayo.

Acto seguido la cámara edométrica es ubicada en el equipo, haciendo contacto con el brazo generador de presión, prestando especial cuidado a la nivelación de éste, pues de eso depende la precisión en la transferencia de cargas al espécimen. Se ubica el respectivo dial de deformación, para registrar los asentamientos, y finalmente se adiciona una masa que dé lugar a un esfuerzo neto de precarga de 10 kPa, con el que es posible evaluar comportamiento expansivo del suelo ensayado. Esta presión se deja actuar durante 24 horas, luego de las cuales se procede a saturar una de las muestras, y una vez hecho esto se comienzan a aplicar incrementos graduales de carga, de modo que se dupliquen los esfuerzos cada día, tomando nota de las deformaciones en los períodos de tiempo estipulados por la norma.

El ensayo termina con la etapa de descarga, en que son retiradas las cargas sucesivamente comenzando por la última que se aplicó, y registrando las deformaciones en los especímenes.



Figura 20. Montaje para la ejecución del ensayo Duploedométrico.

3.3.3.2. Ensayo Pinhole

El ensayo Pinhole es una medida directa de la erodabilidad de los suelos finogranulares y consiste en hacer fluir agua a través de un pequeño agujero en un espécimen de suelo, en que dicho flujo simula la circulación de agua a través de una grieta u otra estructura.

Un agujero del 1.0 mm de diámetro es perforado a través de una muestra de suelo cilíndrico de 25.0 mm de largo por 35.0 mm de diámetro. Desde un tanque el agua destilada es percolada bajo cargas de 50.0, 180.0, 380.0, 650.0 y 900.0 mm columna de agua. En cada uno de los cuales se toman caudales que fluyen, bien sea a volumen o a tiempo controlado.

Este ensayo es desarrollado de acuerdo con la norma ASTM-D4647, aunque es contemplado con más detalle en la normativa Brasileira ABNT-NBR14114.

(Camapum, 2006), propone analizar los resultados del ensayo Pinhole a partir de la curva *Caudal vs Gradiente Hidráulico*. Cuando se obtiene una curva con un comportamiento casi lineal y con un ligero desplazamiento hacia abajo, el suelo se considera como no dispersivo. Por otra parte el suelo se considera dispersivo, cuando la curva presenta inflexión bien marcada hacia la parte

superior de esta. Hay también, una curva en que el tramo de descarga de la curva muestra claramente valores muy pequeños, es decir, una disminución considerable en el caudal que fluye, en comparación con el dado para el tramo de carga. Esta es la curva típica que representa el fenómeno conocido como taponamiento, el cual es signo de un grado severo de dispersión en el suelo.

El montaje consiste en disponer el espécimen ya descrito dentro de un molde cilíndrico de acrílico, ubicando a ambos lados de él una arena gruesa que favorezca la permeabilidad, cubierto por una rejilla y un trozo de geotextil, para evitar contaminar la muestra. El cilindro es sellado por sus dos caras, y se conecta con un piezómetro, en el que se registran las cabezas de presión aplicadas al flujo.

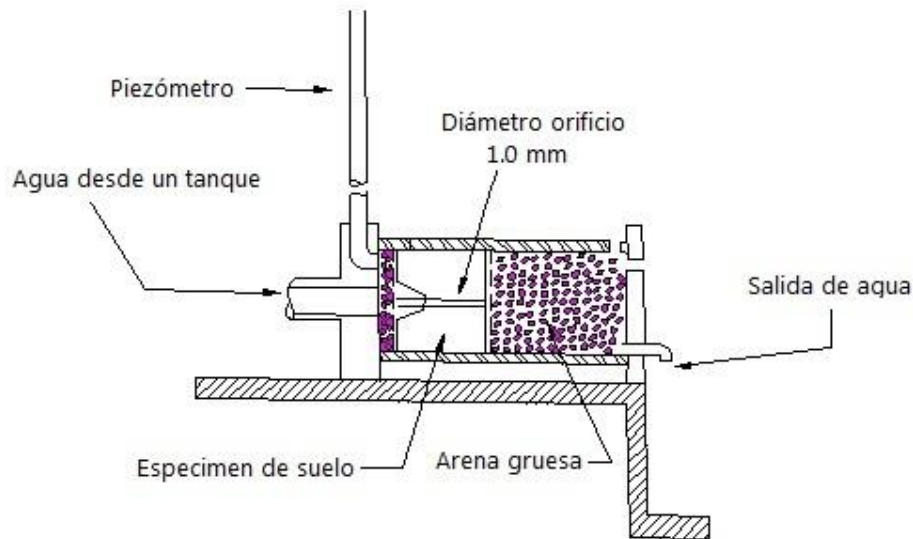


Figura 21. Esquema del montaje usado para el ensayo Pinhole.
(Tomado y modificado de Norma ASTM-D4647. Recuperado el día 1 de Mayo de 2013).

3.3.3.3. Ensayo Crumb

Esta prueba consiste básicamente en la preparación de un espécimen cúbico de 15.0 mm de lado o la elección de un terrón de suelo (Crumb) secado al aire de igual volumen. El espécimen es colocado cuidadosamente dentro de 250 ml de agua destilada. Mientras el terrón de suelo se comienza a hidratar, se observa la tendencia de las partículas coloidales a deflocularse naturalmente e incluso a entrar en suspensión dependiendo de su tamaño. La tendencia para que las partículas de arcilla entren en suspensión coloidal es observada después de 2 minutos, de una hora y de 24 horas de inmersión.

Con el objetivo de evaluar cómo influye el secado del suelo en el resultado de la prueba Crumb ésta es realizada también para especímenes en condiciones de humedad natural, para poder establecer claras diferencias, en caso de que las haya.

A pesar de que se trata de un ensayo cualitativo y con alto grado de subjetividad, la metodología para las observaciones está claramente descrita en la norma ASTM-D6572, y a partir de ella surgen los siguientes parámetros para su interpretación, con base en los cuales se clasifica el suelo en cuatro categorías, que valoran progresivamente el aumento del fenómeno de la dispersión, como estimativo inicial de una posible tendencia hacia el fenómeno de la erosión superficial.

Grado 1 - No dispersivo - El desmenuzado puede desmoronarse y esparcirse en el fondo del cubilete en amontonamiento plano, sin ningún signo de agua nublada causada por coloidales en suspensión. Puede incluso, conservarse en el terrón original.

Grado 2 – Intermedio - Simple insinuación de nubosidad en agua en la superficie del terrón. Desmoronamiento, mas no se presentan sólidos en suspensión.

Grado 3 - Dispersivo - Nubosidad de coloides con diámetro de hasta 10.0 mm, fácilmente reconocible en suspensión. Usualmente diseminado en trazas delgadas en el fondo del recipiente.

Grado 4 – Altamente dispersivo - Nubosidad coloidal cubre casi la totalidad del fondo del recipiente, usualmente en una superficie muy delgada. En casos extremos observa turbiedad en toda el agua.

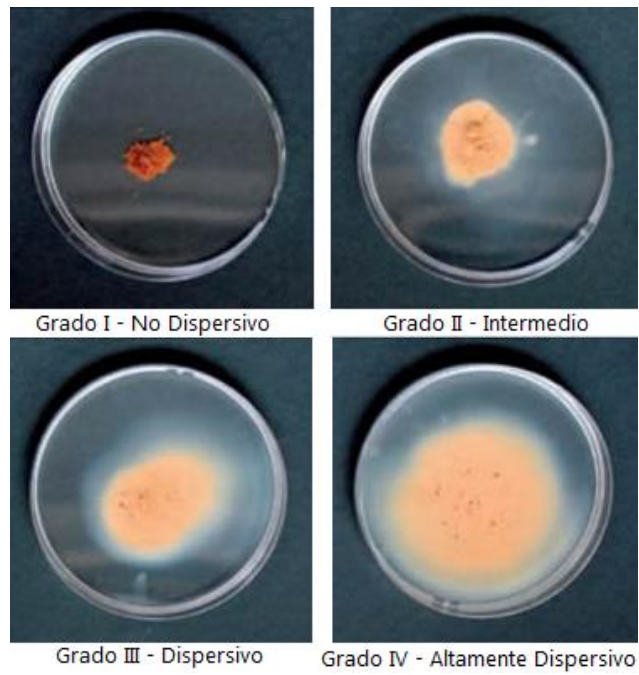


Figura 22. Guía para la valoración de la dispersión, en el ensayo Crumb.
(Tomado y modificado de *Australian Department of Agriculture*. Disponible en <http://www.agric.wa.gov.au>.
Recuperado el día 2 de Mayo de 2013).

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestra un compendio de los resultados de cada una de las pruebas. En principio, son vistos los ensayos que constituyen la caracterización física del suelo. Seguido, se muestran aquellas pruebas relacionadas con la parte química y mineralógica. Para finalizar, se discuten los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización hidráulica. Todo esto en virtud de dar respuesta a las preguntas planteadas como objetivos de este trabajo.

Para efectos de practicidad en la presentación de los resultados, en adelante serán usadas las siguientes convenciones, para hacer referencia al tipo de muestra y a las condiciones en que son desarrollados cada uno de los ensayos de laboratorio:

Tabla 3. Convenciones usadas como abreviaturas en los resultados.

<i>Nat</i>	Muestra en estado natural (sin adición de contaminantes)
<i>Jab</i>	Muestra contaminada por saturación con solución jabonosa.
<i>Gas</i>	Muestra contaminada por saturación con gasolina.
<i>Hnat</i>	Muestra ensayada bajo condiciones de humedad natural.
<i>Air</i>	Muestra ensayada bajo condiciones de secado al aire.
<i>Horn</i>	Muestra ensayada bajo condiciones de secado en horno.
<i>NS</i>	Muestra ensayada en estado no saturado.
<i>S</i>	Muestra ensayada en estado saturado.
<i>SD</i>	Muestra ensayada sin el uso de sustancia defloculante.
<i>CD</i>	Muestra ensayada con el uso de sustancia defloculante.

4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Esta sección contiene básicamente lo que en principio se ha denominado *Propiedades Índice*, en las que están incluidas las pruebas de *Límites de consistencia*, *Análisis granulometría* y *Peso específico de sólidos*, con las que se puede clasificar el suelo según la metodología *USSC*. Además se propone el sistema *MCT* como técnica alternativa para la clasificación del suelo en sus diferentes estados.

4.1.1. Contenido de humedad

Para iniciar, de las muestras alteradas en estado natural fueron tomadas aleatoriamente 10 pequeñas porciones, con el objetivo de hallar la humedad natural de referencia para los análisis posteriores. Los resultados se presentan a continuación.

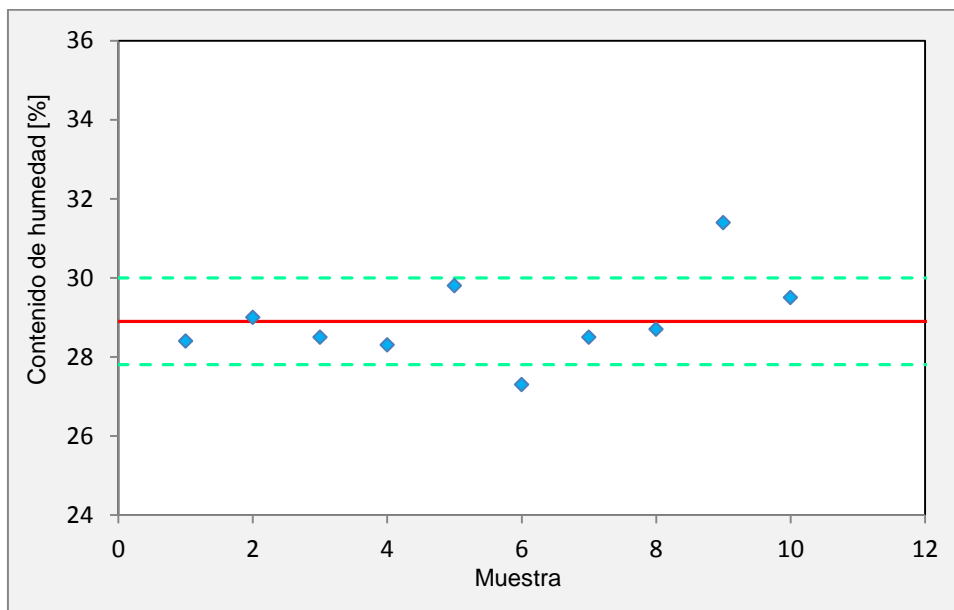


Figura 23. Contenido de humedad muestras en estado natural.

A partir de este conjunto de datos se obtiene un valor medio con la respectiva desviación estándar.

$$\omega_{nat}[\%] = 28,9 \pm 1,1$$

Asimismo, una vez transcurrido el período en que se dejaron actuar los contaminantes en las muestras inalteradas, se estimó el contenido de humedad para chequear su coherencia con las condiciones iniciales de las muestras.

Tabla 4. Contenido de humedad inicial para muestras objeto de estudio.

Muestra	Nat	Jab	Gas
Humedad [%]	28	28	29

4.1.2. Peso específico de sólidos

Aunque se espera que el peso específico de sólidos no sufra alteraciones considerables por el proceso de contaminación, fue evaluado tanto para la muestra natural, como para las contaminadas, en dos condiciones de secado distintas, pues no es posible realizar la prueba en estado de humedad natural. Los resultados se muestran a continuación

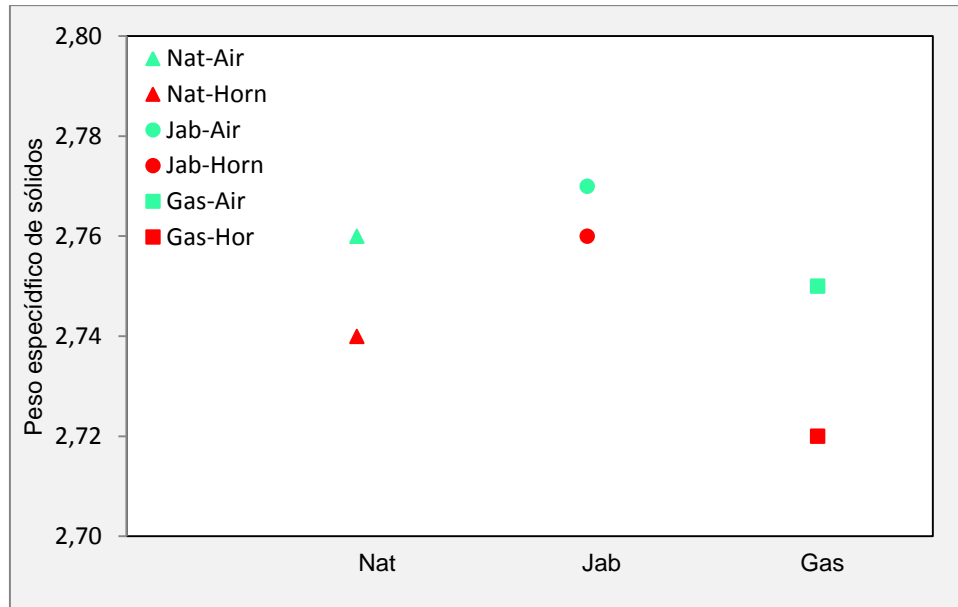


Figura 24. Peso específico de sólidos de las muestras.

A pesar que las variaciones son de un orden de magnitud relativamente pequeño, y que se encuentra dentro de los límites de variación permitidos por la norma, que puede ser de hasta 0,05 unidades, si se observa detalladamente, todos los ensayos realizados en condiciones de secado al horno se encuentran por debajo de aquellos secados al aire. La muestra contaminada con gasolina es la que mayor variación presenta entre ambos estados de secado, siendo 2,75 el valor estimado para la seca al aire, y 2,73 para la seca al horno.

En general, los suelos residuales tropicales presentan pesos específicos de sólidos que varían entre 2,60 y 2,80, dependiendo de la composición de los minerales arcillosos, bien sean desarrollados por los procesos de meteorización o heredados directamente de la roca madre. (Sandroni, 1981).

4.1.3. Análisis granulométrico

Se calculan, para cada una de las pruebas realizadas, dos parámetros que se usan para caracterizar las agregaciones, que se forman entre las partículas más finas del suelo. (Santos, 1975).

Estabilidad de las agregaciones – Cuantifica la diferencia porcentual entre las partículas de diámetro < 5 μm de con y sin defloculante.

$$Eag = \%Arcillas (< 5\mu m)CD - \%Arcillas(< 5\mu m)SD$$

Nivel de las agregaciones – Relaciona la Estabilidad de las agregaciones con respecto al porcentaje de partículas de diámetro < 5 μm con defloculante.

$$Nag = \frac{\%Arcillas (< 5\mu m)CD - \%Arcillas(< 5\mu m)SD}{\%Arcillas (< 5\mu m)CD}$$

Inicialmente, se plantea la granulometría de la muestra en estado natural, como base de los posteriores análisis. Se presentan a continuación las curvas producto de las etapas de tamizado mecánico y de doble hidrómetro, esta última realizada con y sin defloculante.

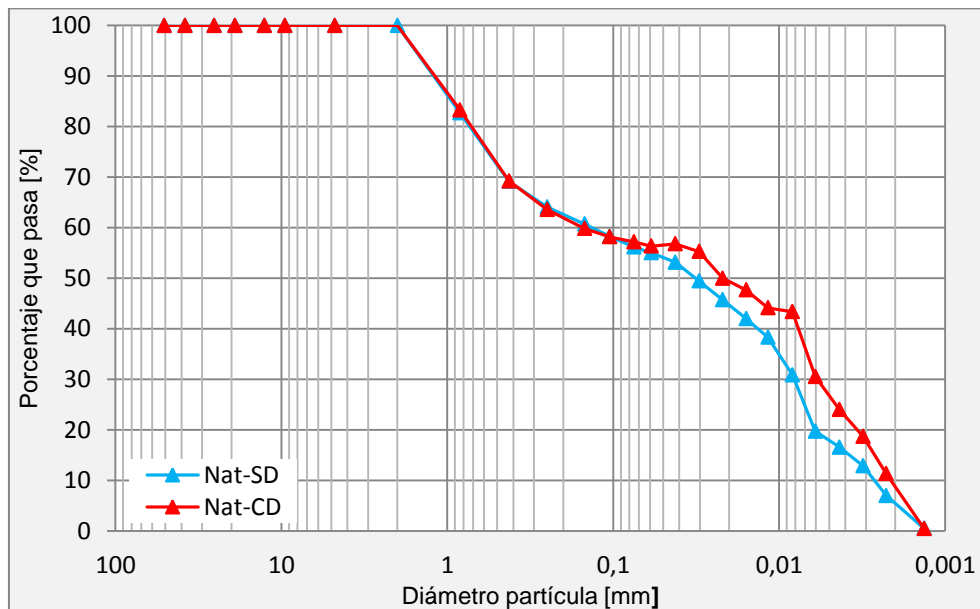


Figura 25. Curva granulométrica de la muestra natural.

En este caso no se observan grandes diferencias entre las dos curvas, ambas tienen la misma tendencia, a pesar que en la etapa del hidrómetro se observa tendencia a una mayor cantidad de partículas finas en aquella que representa el ensayo con defloculante. La estabilidad de agregaciones es de 10,8 %. Por otro lado, el nivel de agregación es de 0,35.

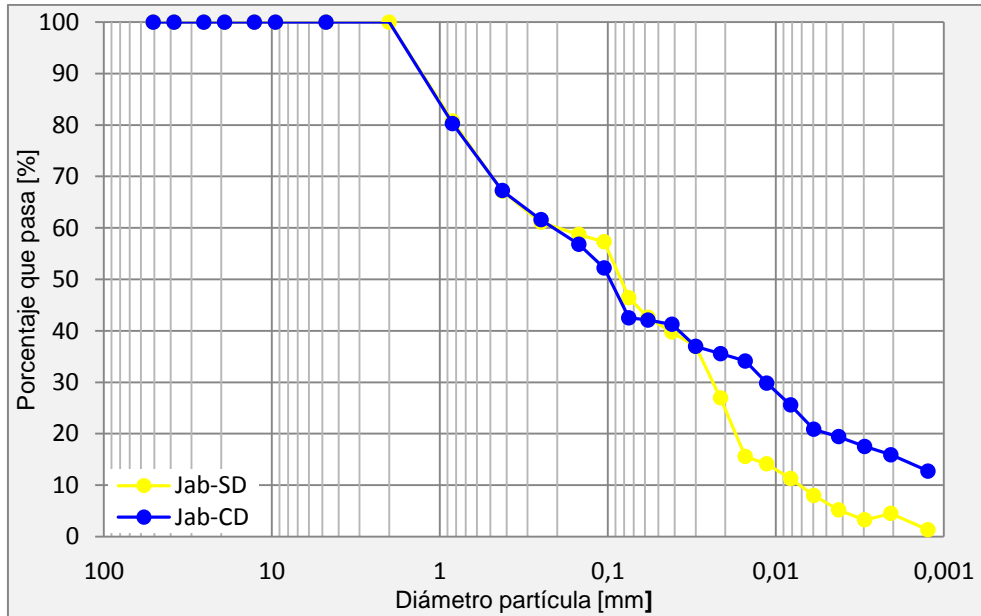


Figura 26. Curva granulométrica de la muestra Jab.

A partir del análisis de la gráfica anterior puede decirse que el efecto del defloculante es considerable, ya que la caída generada entre las curvas granulométricas con y sin defloculante es mayor que 10,0 %, en toda la etapa del hidrómetro. En cuanto a la estabilidad de las agregaciones calculada, ésta tiene un valor de 13,9 %, y el nivel de agregación es 0,62.

A continuación es presentada la curva de análisis granulométrico para la muestra que fue sometida a la acción de la gasolina como agente contaminante.

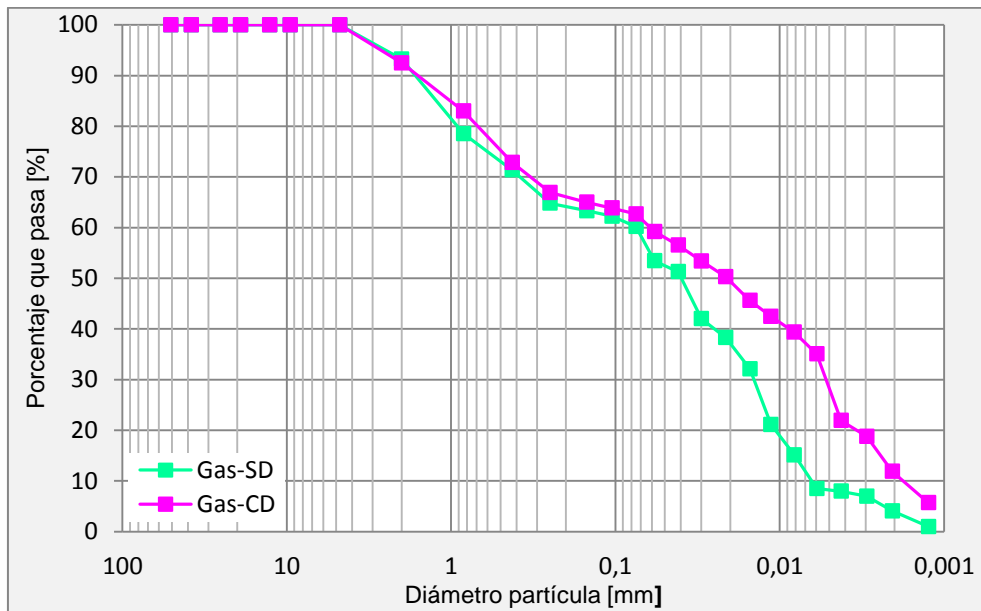


Figura 27. Curva granulométrica de la muestra Gas.

La curva de la muestra ensayada con defloculante se encuentra sobre la que se ensayó sin la presencia de dicho agente en toda su longitud.. La estabilidad de las agregaciones es de 26,5 %, y el nivel de agregación calculado es 0,76.

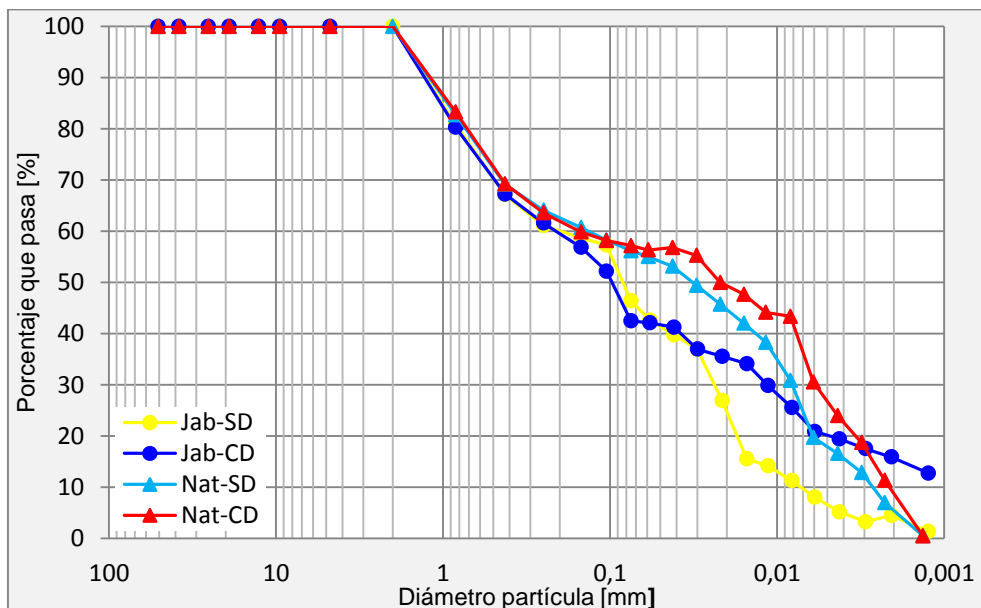


Figura 28. Comparación de granulometría Jab vs. Nat.

En la Figura 28. Comparación de granulometría Jab vs. Nat.se compara el comportamiento de la muestra saturada con solución jabonosa, respecto a la muestra natural. En la que puede observarse como en la muestra contaminada las partículas aparentan tener tamaños mayores, lo que puede asociarse entre otras cosas a la formación de agregaciones entre partículas, que se daría a causa de la acción aglutinante del jabón presente en la solución. Esto es corroborado por medio del nivel de agregación que se duplica para en caso contaminado.

De igual manera, se presentan en paralelo las curvas de la muestra contaminada con gasolina y la natural.

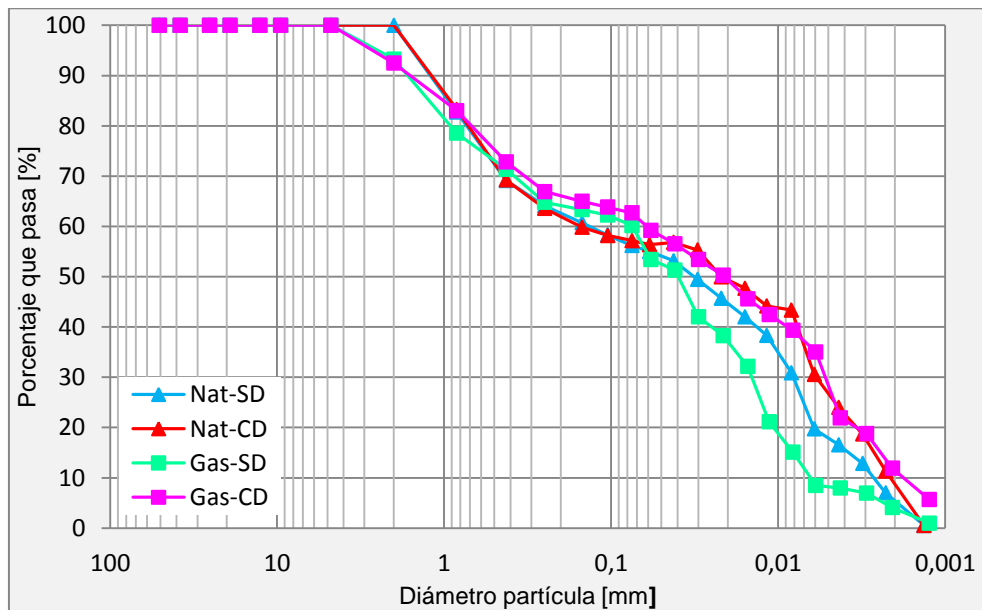


Figura 29. Comparación de granulometría Gas vs. Nat.

En este caso puede observarse una tendencia bastante similar entre ambas granulometrías para los ensayos ejecutados usando el defloculante. Una clara diferencia se establece en aquellas sin defloculante, a partir de las cuales tiene sentido afirmar que se forman enlaces débiles entre partículas, que se rompen y producen desagregaciones de gran tamaño como se puede evidenciar a través de los valores de estabilidad de agregación que se duplican en el caso de la gasolina, lo que da claro indicio de grandes reacciones, fuera del rango normal, causadas por el contaminante.

4.1.4. Límites de consistencia

Fueron ejecutados en total 9 ensayos de límites de consistencia, para 3 estados de contaminación en 3 condiciones de secado diferentes. Los resultados son presentados en la Carta de Plasticidad de Casagrande, con el fin de poder clasificar la fracción fina de los especímenes por medio del sistema USCS.

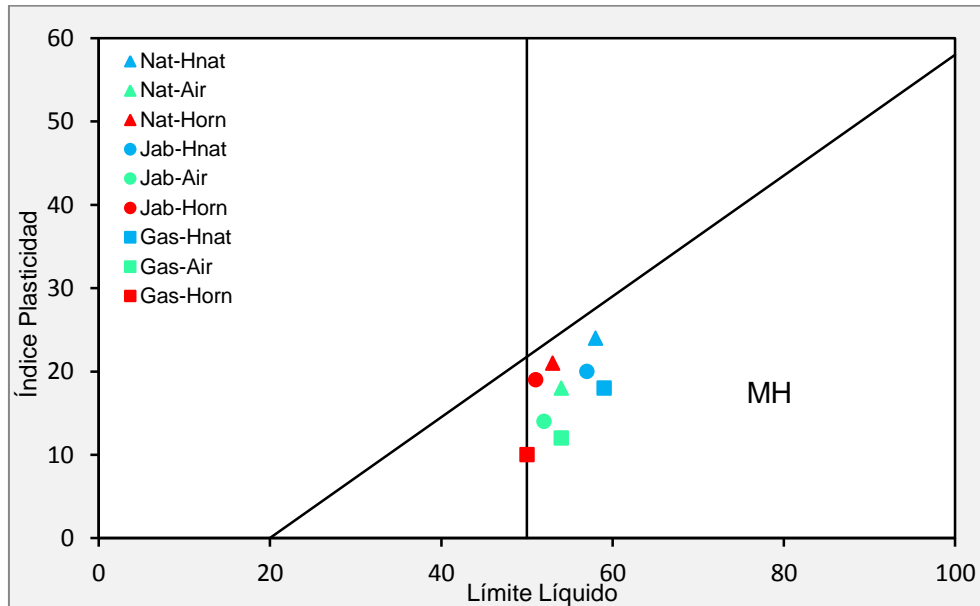


Figura 30. Carta de Plasticidad de Casagrande.

Para todos los casos el suelo clasifica como un limo de alta plasticidad MH, aunque en algunos no es tan claro debido a su cercanía con la línea B, esto se debe a una pérdida de amplitud en el rango en que el suelo se comporta plásticamente, expresado como una disminución en el límite líquido, este es el caso de los especímenes ensayados secos al horno.

Para la muestra contaminada con jabón se presenta una particularidad, aquellos especímenes ensayados secos, bien sea al aire o al horno, exhiben entre si un comportamiento muy similar, pero ambos distan de lo que mostró la muestra en condiciones de humedad natural, la diferencia está expresada como una clara disminución en el límite líquido, lo que quiere decir que el suelo, para un contenido de humedad menor se comporta como fluido aparente.

Por otro lado puede verse claramente que los especímenes contaminados con gasolina son los que presentan menores índices de plasticidad, lo que se puede explicar como una disminución en el rango de apariencia sólida de las partículas, de tal modo que para que éstas presenten una

consistencia firme, deba disminuirse considerablemente su contenido de humedad, esto es, un límite plástico más bajo.

Se presenta además una gráfica de Índice de actividad vs. Fracción fina, sobre la que es posible hacer algunas consideraciones más.

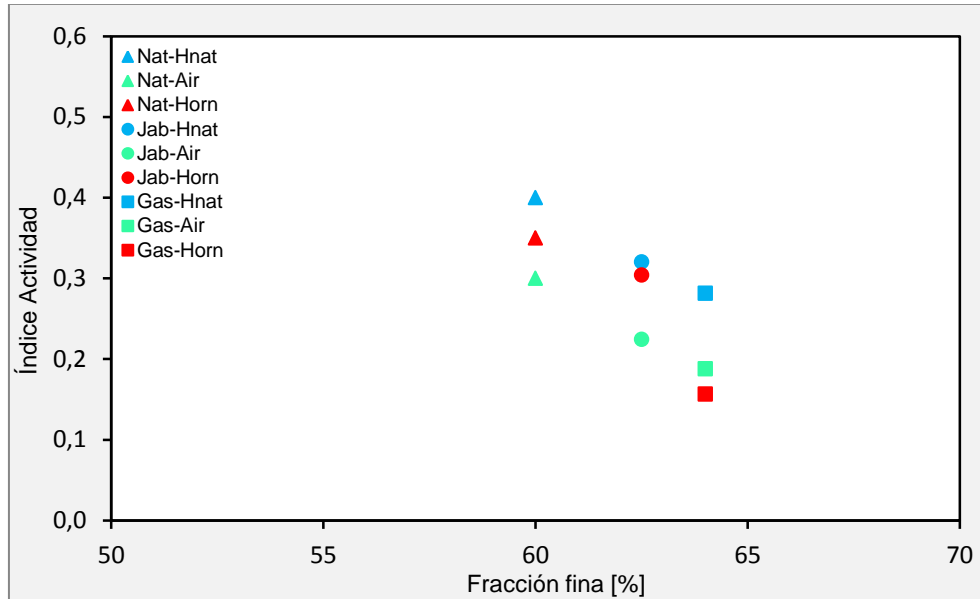


Figura 31. Índice de actividad vs. Fracción fina.

Puede decirse, a la luz del resultado anterior que se da una disminución considerable en lo referente a la plasticidad del suelo, expresando ésta como una función directamente proporcional al índice de actividad, siendo más crítica esta baja en el caso de la muestra contaminada con gasolina.

4.1.5. Clasificación expedita MCT

El ensayo fue realizado a 15 muestras, 5 en cada uno de los estados de contaminación. Por la naturaleza del ensayo no hay posibilidad de llevarlo a cabo para especímenes secos.

Se obtuvo que el suelo en los tres ensayos presenta las características de un suelo tropical del subgrupo LG', con contracciones diametrales del orden de 1,1 mm y penetraciones de 1 unidad. Este grupo corresponde a *Arcillas lateríticas - Arcillas lateríticas arenosas*.

A continuación se evalúa la compatibilidad de este resultado con el obtenido al usar el Sistema Unificado (USCS).

Tabla 5. Comparativo entre los sistemas de clasificación USCS y MCT.
(Nogami & Villibor, 1995).

Granulometría Típica		Arcillas	Arenas limosas	Limos	Arcillas	Arenas limosas	Arenas arcillosas	Arcillas
		Limos		Limos arenosos	Arcillas arenosas			Limos arcillosos
Comportamiento		N= No lateríticos				L= Lateríticos		
Grupo MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Grupos tradicionales obtenidos de muestras clasificadas en grupos MCT discriminados en tipos de columnas	USCS	SP	MS	SM,CL	MH	SP	SC	MH
		SM	SC	ML,MH	CH	SC		ML
			ML			CH		

Así pues, queda definida la coherencia entre los resultados obtenidos por cada sistema de clasificación, aunque debe aclararse que no necesariamente un limo de alta plasticidad (MH) está asociado a un suelo laterítico. Sin embargo, un suelo laterítico de tipo LG', probablemente se considere un limo, según el Sistema Unificado.

4.1.6. Resumen de propiedades índice

Finalmente, se presentan los resultados importantes de la caracterización física, de modo que se pueda conocer con precisión su valor y se puedan comparar e identificar tendencias en el comportamiento frente a las diversas condiciones de ensayo.

Tabla 6. Resumen de propiedades índice.

Muestra		LL	LP	IP	Act	% Finos	Wnat [%]	Gs	e	USCS	MCT
Nat	Hnat	58	34	24	0,40	59	28	-	1,37	MH	LG'
	Air	54	36	18	0,30		-	2,76	-		
	Horn	53	32	21	0,35		-	2,74	-		
Jab	Hnat	57	37	20	0,32	62	28	-	1,15	MH	LG'
	Air	52	38	14	0,22		-	2,77	-		
	Horn	51	32	19	0,30		-	2,76	-		
Gas	Hnat	59	41	18	0,28	64	29	-	1,28	MH	LG'
	Air	54	42	12	0,19		-	2,75	-		
	Horn	50	40	10	0,16		-	2,72	-		

4.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA

En lo que respecta a la caracterización química y mineralógica del suelo, se presentan los resultados de los ensayos ejecutados para tales fines. Se evaluó el efecto de la interacción con los contaminantes en la parte química mediante el ensayo de pH, como también las alteraciones en la microestructura del suelo por medio de las pruebas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y Difracción de rayos X (DRX).

4.2.1. Potencial de Hidrógeno – pH

A continuación son mostrados los resultados de las mediciones de pH, para todas las combinaciones de contaminantes y secado trabajadas en la succión de propiedades índice.

En la totalidad de los casos analizados en laboratorio se tienen ΔpH negativos, lo que sugiere el predominio de los arcillominerales sobre los óxidos e hidróxidos de Fe y Al. Esto puede explicarse en virtud del proceso de meteorización del suelo, pues, éste aún no es tal que le ubique en un claro estado de laterita, pero si lo retira claramente del grupo de los saprolitos, debido a que los arcillominerales son por sí mismos un estado avanzado de descomposición. Además, de los análisis físicos ya se conoce el predominio de las partículas finogranulares.

Tabla 7. Mediciones de pH realizadas.

Muestra		Solvente Agua		Solvente KCl		Δ pH
		Temp [°C]	pH	Temp [°C]	pH	
Nat	Nnat	25,8	7,03	24,9	4,26	-2,77
	Air	25,8	6,86	24,8	4,14	-2,72
	Horn	25,3	6,53	24,4	4,13	-2,40
Jab	Nnat	25,2	5,45	24,9	3,99	-1,46
	Air	25,2	5,73	25,2	3,97	-1,76
	Horn	25,0	5,91	25,3	3,96	-1,95
Gas	Nnat	25,3	5,98	25,5	4,38	-1,60
	Air	25,3	5,88	25,5	4,32	-1,56
	Horn	25,2	5,86	25,6	4,33	-1,53

Se presenta también, una gráfica que relaciona el índice de actividad con el pH medido en KCl. Las observaciones que pueden hacerse están relacionadas con que la muestra en estado natural es la que presenta un comportamiento más plástico. Asimismo, se puede ver que las muestras que contienen jabón son ligeramente más ácidas que las naturales. Para el caso de la gasolina, ésta pareciera disminuir la acidez del suelo.

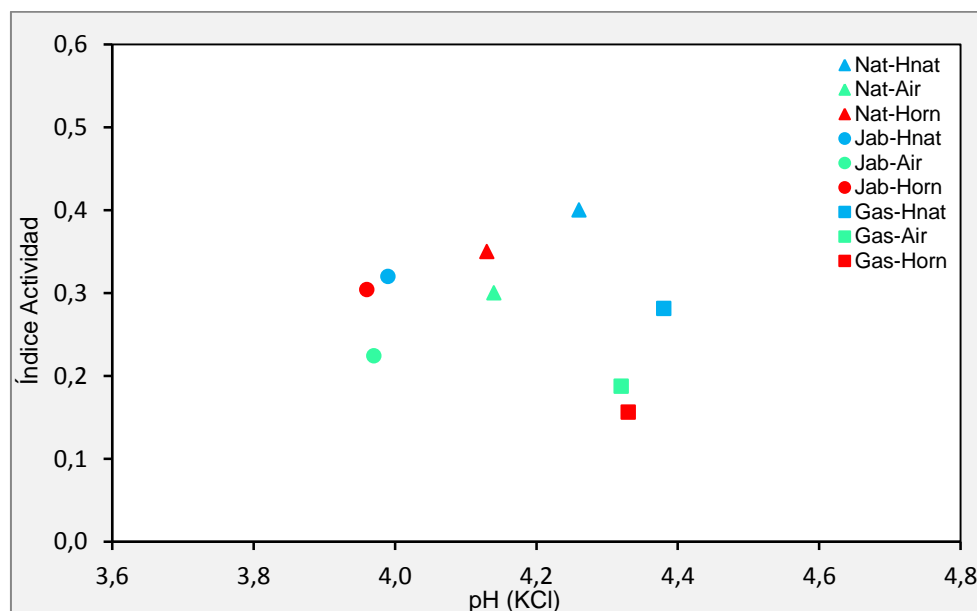


Figura 32. Índice de actividad vs. pH (KCl).

4.2.2. Microscopía electrónica de barrido – SEM

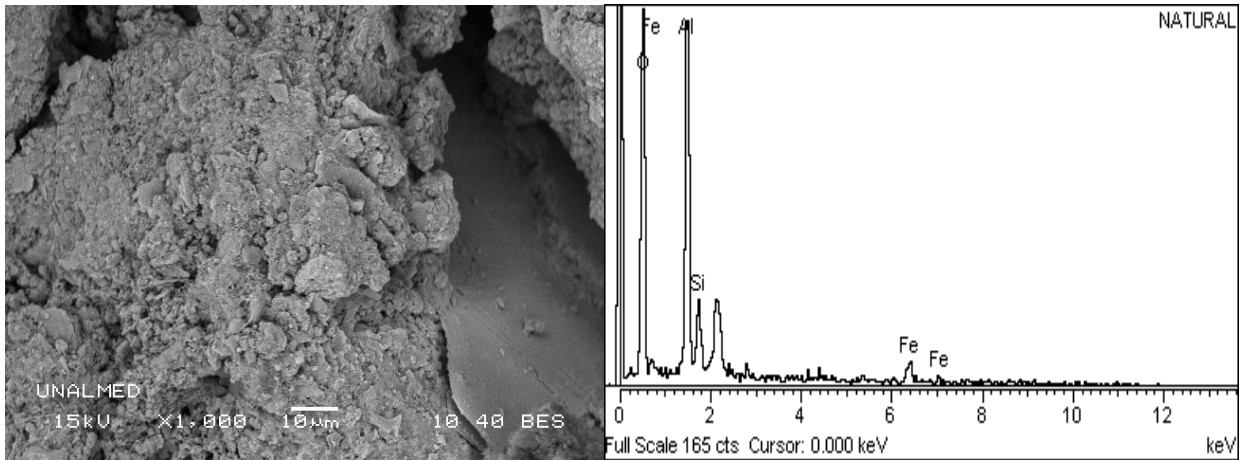


Figura 33. Imagen SEM y análisis mineralógico muestra Nat.

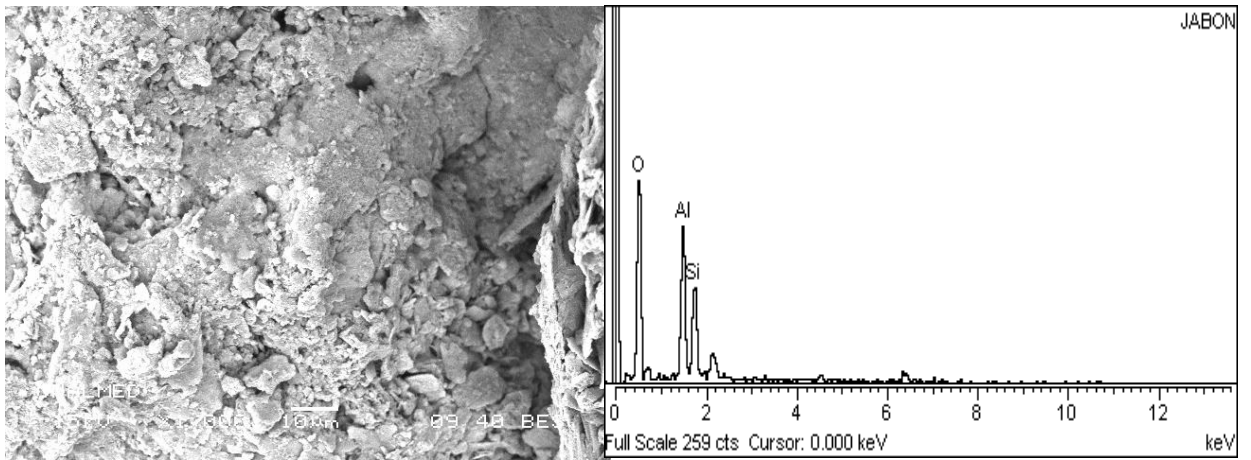


Figura 34. Imagen SEM y análisis mineralógico muestra Jab.

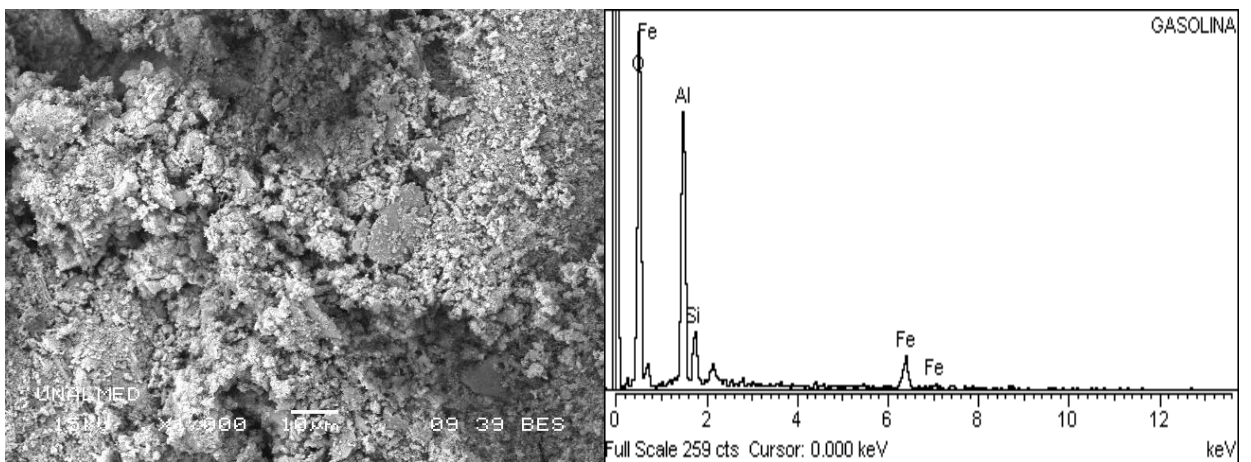


Figura 35. Imagen SEM y análisis mineralógico muestra Gas.

Las electromicrografías fueron captadas de tal forma que se pudiesen analizar los cambios en la estructura del suelo en cuanto al tamaño de sus agregaciones y formación de enlaces entre granos. La primera de las observaciones está relacionada con los minerales que forman el conjunto del suelo, que no cambian entre una y otra muestra. Se registran principalmente tres elementos que son Aluminio, Hierro, y Sílice con leves variaciones en cuanto a la cantidad de cada mineral, pero esto puede estar asociado a la heterogeneidad de las muestras, más aún cuando el SEM es casi un resultado puntual.

De igual que en los demás análisis realizados, la base es la muestra en estado natural. Si ésta es comparada con la muestra afectada con la solución detergente, se pueden establecer diferencias en el tamaño de las microconcreciones, que son mayores para el espécimen alterado. Lo que se interpreta como una tendencia a las agregaciones con la sustancia jabonosa como aglutinante.

Para la muestra contaminada con gasolina, sucede aparentemente lo contrario, el tamaño de las concreciones disminuye considerablemente, y su estructura parece ser más dispersa y sin enlaces entre partículas. El tamaño de los vacíos tiene cierta afinidad con respecto a la muestra natural, incluso en algunas zonas parecen ser mayores.

4.2.3. Difracción de rayos X

En esta sección se presentan los resultados del análisis mineralógico para el suelo estudiado por medio de la metodología DRX.

En los difractogramas es posible identificar algunos picos representativos, que corresponden a minerales como el *Cuarzo* que es común en las rocas del Batolito Antioqueño, y que por su resistencia es capaz de soportar el proceso de meteorización. También se encuentran minerales como la *Kaolinita* y la *Gibbsita*, lo que da validez a lo estimado por medio de la prueba de medición del pH en que se habló de la presencia de arcillominerales.

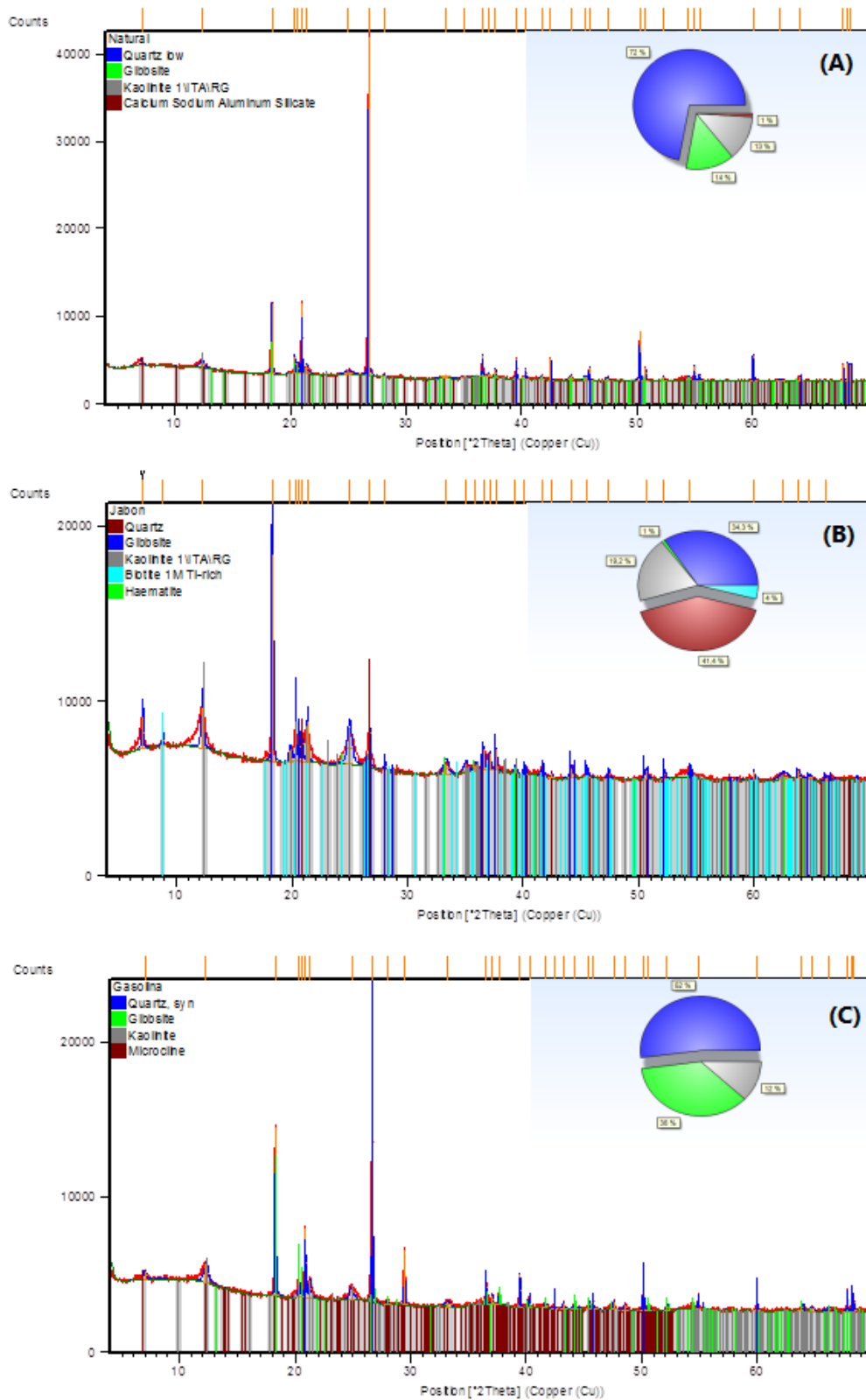


Figura 36. Difractogramas de las muestras. (A) Nat – (B) Jab – (C) Gas.

4.3. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

Esta sección incluye los resultados de los ensayos ejecutados para valorar el efecto de la interacción del suelo con los agentes contaminantes y su comportamiento hidromecánico.

4.3.1. Ensayo duploedométrico

Los ensayos duploedométricos posibilitan la determinación de la zona de colapso del suelo, como el sector comprendido entre las curvas de compresibilidad, de la misma manera la estimación de la carga crítica ante el colapso, como aquella en que la distancia de una curva a otra es mayor.

No necesariamente la relación de vacíos inicial de todos los especímenes es la misma, por lo que las curvas se presentan para las relaciones de vacíos normalizadas, es decir, expresando cada una como una porción de la que tenía el suelo al inicio de la prueba.

El colapso es cuantificado por medio del Potencial de colapso, que expresa en forma porcentual la diferencia entre un punto de la curva edométrica no saturada y un punto con la correspondiente presión aplicada sobre la curva edométrica saturada. (Jennings & Knight, 1975).

$$CP = \frac{\Delta e_c}{(1 + e_{NS}/e_{oNS}) \times e_{omedio}} \times 100$$

Donde

$$\Delta e_c = [(e_{NS}/e_{oNS}) - (e_s/e_{oS})] \times e_{omedio}$$

Además

$$e_{omedio} = \frac{e_{oNS} + e_{oS}}{2}$$

Una vez calculado el *Potencial de colapso (CP)*, se puede estimar a partir de su valor la severidad del problema de colapso, así.

Tabla 8. Clasificación de la colapsabilidad para obras de ingeniería. (Jennings & Knight, 1975).

CP	Gravedad del problema
0,0 - 1,0	Ninguno
1,0 - 5,0	Moderado
5,0 - 10,0	Problemático
10,0 - 20,0	Grave
> 20,0	Muy grave

A la luz de la información presentada anteriormente se procede a analizar los resultados de las tres pruebas duploedométricas que se llevaron a cabo. Se muestra una tabla con los valores más significativos.

Tabla 9. Resumen de los ensayos duploedométricos.

Propiedad	Muestra		
	Nat-S	Jab-S	Gas-S
e_0	1,37	1,15	1,51
e_r	1,21	0,87	0,81
σ_{crit} [kPa]	800,00	800,00	800,00
CP [%]	2,9	6,3	12,0
σ_s [kPa]	144,76	127,16	106,58
Cc	0,11	0,23	0,42

Una de las observaciones importantes está relacionada con el *índice de compresión* (C_c) de los ensayos. Como puede observarse este valor es mayor en las pruebas contaminadas, que en la que se desarrolló en condiciones naturales, lo que se explica como una disminución más rápida para la relación de vacíos.

Las curvas de compresibilidad se muestran a continuación. La primera de ellas, es aquella ejecutada para el espécimen en estado natural.

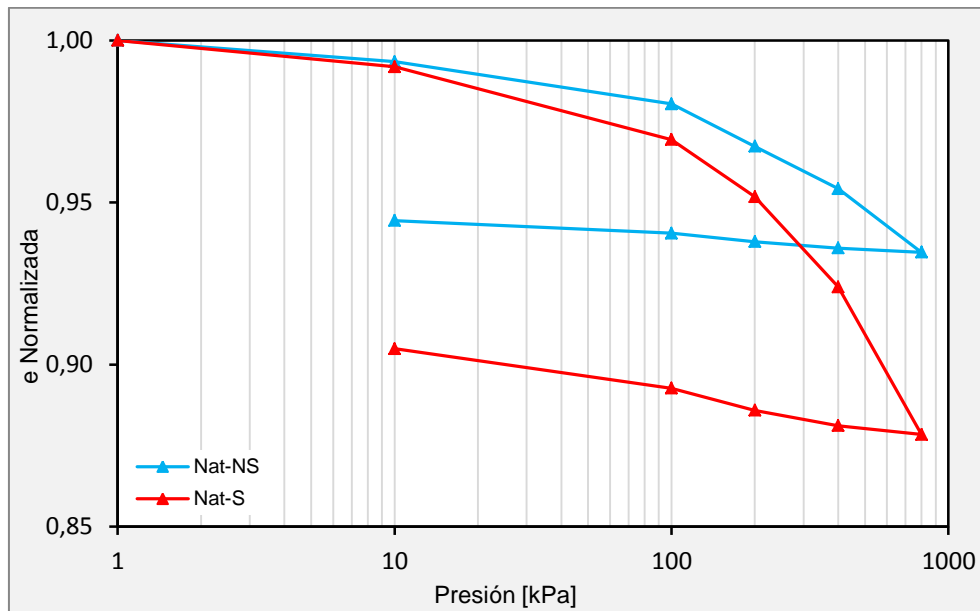


Figura 37. Curva de compresibilidad. Muestra Nat.

La zona de colapso entre las dos curvas da indicio de la pequeña magnitud del fenómeno, el Potencial de colapso calculado es mayor para la presión de 800 kPa, donde vale 2,9 %, lo que lo perfila como un suelo de colapsabilidad moderada.

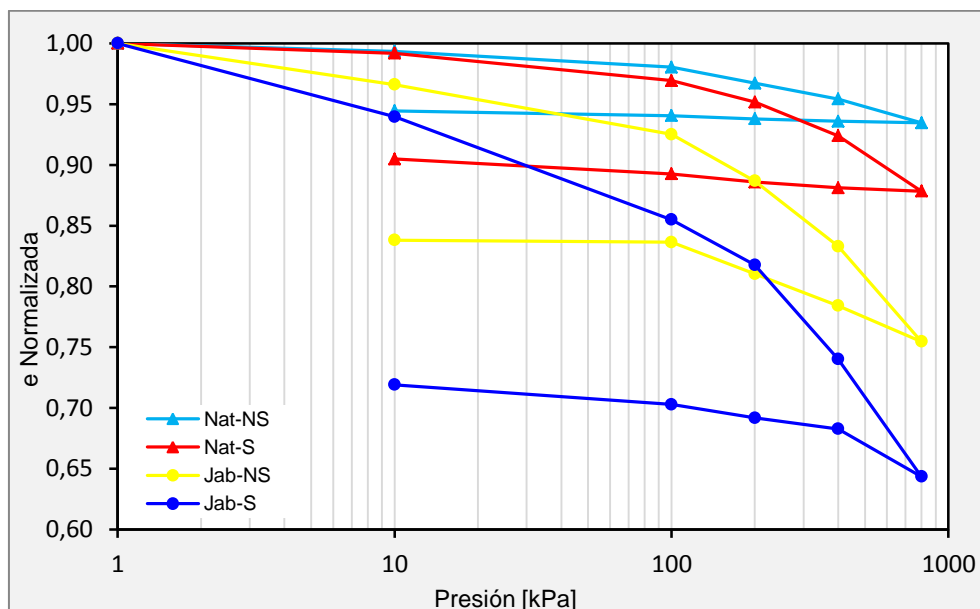


Figura 38. Curva de compresibilidad. Muestra Jab vs. Muestra Nat.

Por otro lado, las curvas que corresponden a la muestra contaminada con solución jabonosa, son evidencia de un colapso de mayor proporción, sustentado por una caída gradual de la relación de vacíos a lo largo de toda la etapa de carga, lo que incluso dificulta la estimación del *Esfuerzo de preconsolidación* (σ_s). En cuanto al potencial de colapso, éste llega a ser 6,3 %, lo que hace que clasifique como Problemático, es decir, que un nivel por encima de la muestra natural.

Es mostrada ahora la curva de compresibilidad del suelo con gasolina, comparada con la del suelo natural.

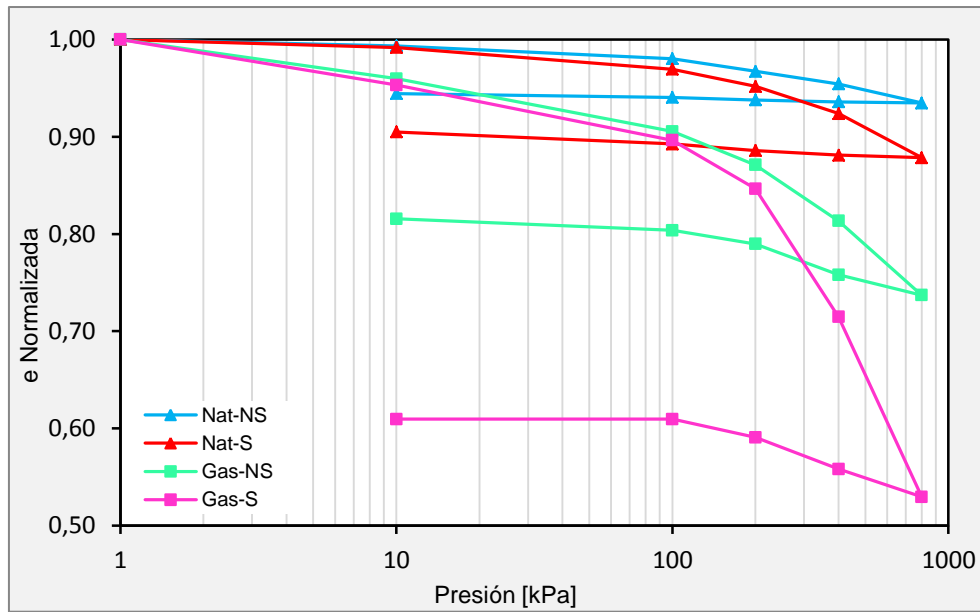


Figura 39. Curva de compresibilidad. Muestra Gas vs. Muestra Nat.

En lo relacionado con compresibilidad de la muestra contaminada con gasolina, a través de las curvas de la Figura 39. Curva de compresibilidad. Muestra Gas vs. Muestra Nat. es posible hablar de un aumento del colapso, esta vez por una caída súbita de la relación de vacíos desde el incremento de carga de 200 kPa, punto a partir del que se considera el suelo con un *problema de colapsabilidad grave*, sustentado por un potencial de colapso que llega a ser del orden de 12 % para una presión crítica de 800 kPa, que es la más grande que se aplicó durante el ensayo.

Finalmente, con el objetivo de valorar las condiciones de colapso más desfavorables, se presentan aquellas curvas con las que se varían de manera simultánea las dos condiciones de ensayo manipuladas para este trabajo, la contaminación y el estado de saturación del suelo. Es

decir que se compara el suelo natural no saturado, con las curvas del suelo contaminado y saturado en ambos casos.

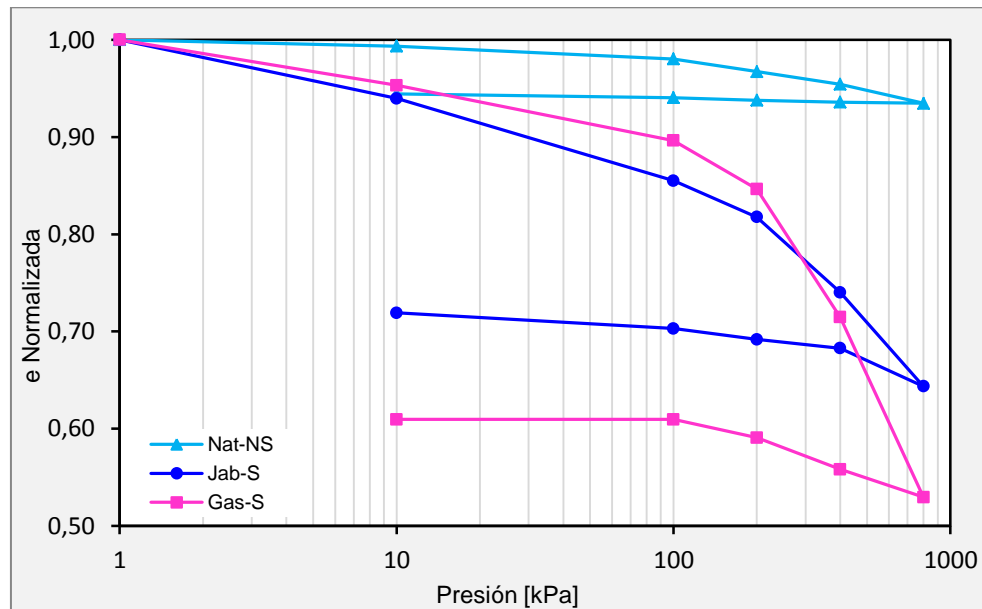


Figura 40. Curva de compresibilidad. Muestra Nat-NS vs. Muestra Jab-S.
Muestra Nat-NS vs. Muestra Gas-S.

Evaluando primero el suelo que contiene solución jabonosa, éste queda enmarcado en el grupo de aquellos suelos con *problemas de colapsabilidad grave*, con un Potencial de colapso de 15 %, respecto a la muestra natural no saturada para la presión de 800 kPa.

En el caso de la muestra con gasolina, ésta, para una presión ejercida de 800 kPa, tiene un Potencial de colapso de 21 %, lo que la ubica desde todo punto de vista, como el caso más crítico de los estudiados, como un suelo con *problemas de colapsabilidad muy graves*.

4.3.2. Ensayo Pinhole

Para estimar qué tan propenso puede ser el suelo residual estudiado al fenómeno de la *Erosión interna o Pipping* se llevaron a cabo un total de tres ensayos Pinhole, que corresponden a los resultados gráficos presentados a continuación.

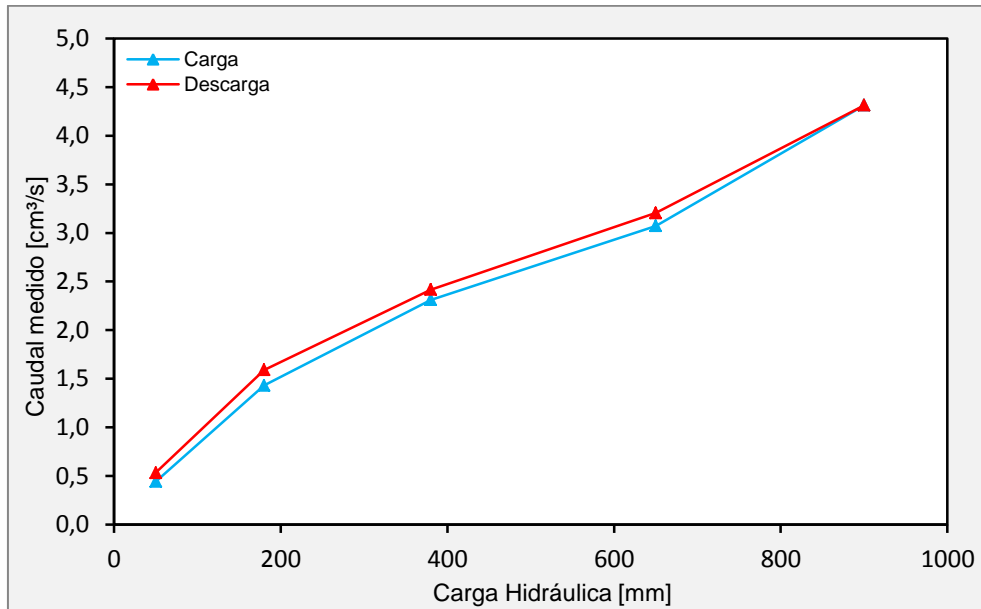


Figura 41. Curva Pinhole. Muestra Nat.

A partir de la curva Pinhole se puede decir que el suelo por sí sólo no presenta problemas de dispersión interna, pues es evidente que tanto el tramo de carga, como el de descarga presentan condiciones de flujo similares, además no se observó turbiedad en el agua que discurrida a través del orificio, el cual tuvo un ligero aumento de diámetro, al parecer no suficiente para debilitar las fuerzas debidas a la tensión superficial del agua.

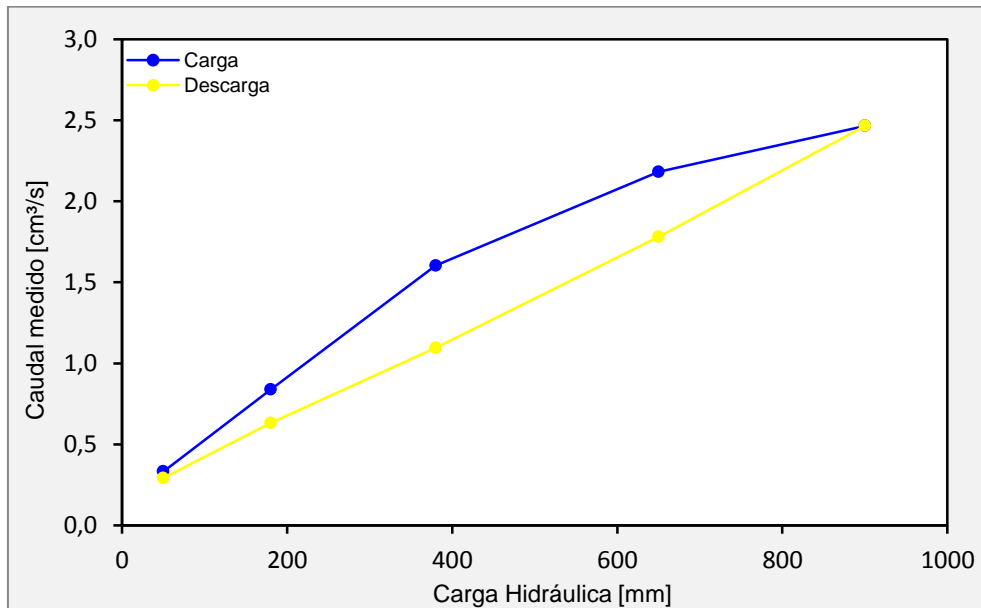


Figura 42. Curva Pinhole. Muestra Jab.

Se observa que la acción del jabón en el suelo hace que éste presente un cierto grado de erodabilidad interna que conlleva un leve taponamiento del agujero por lo que se ve una disminución para el caudal en el tramo de descarga en las mismas cargas hidráulicas. El agua que pasó a través la muestra presentó una turbiedad baja, sin embargo llevaba suspendidos algunos coloides.

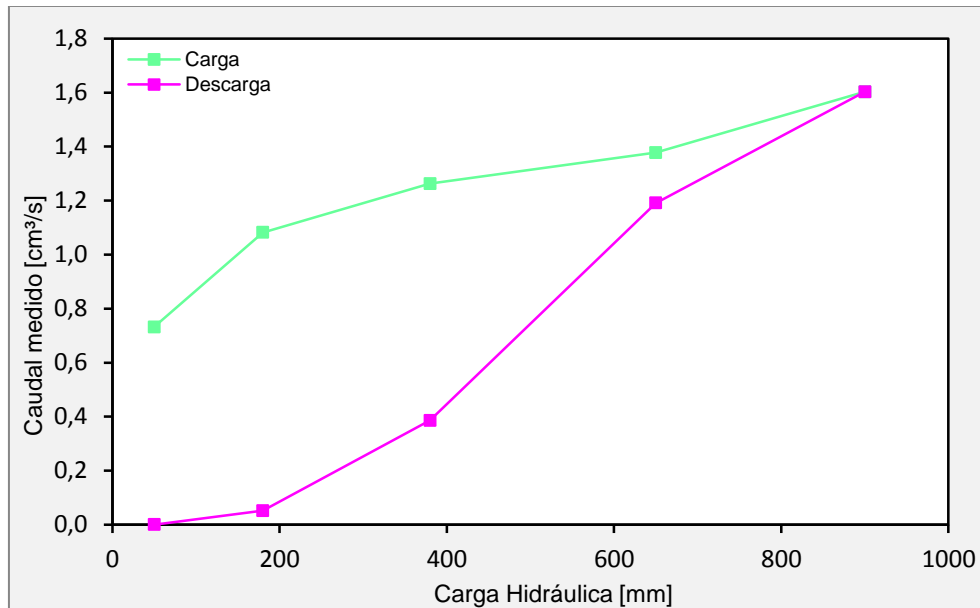


Figura 43. Curva Pinhole. Muestra Gas.

Para el caso de la muestra contaminada con gasolina, se verifica lo que se presumía a partir de las imágenes SEM, es decir, que el efecto del hidrocarburo sobre el suelo es romper las concreciones existentes por la naturaleza del suelo entre las partículas. Esto se evidencia en la curva Pinhole como una diferencia bastante considerable en las trayectorias de flujo para un mismo gradiente hidráulico. Se produce un taponamiento casi total en las últimas mediciones de la etapa de descarga. El agua que atravesó la muestra tenía una turbiedad alta, con muchos coloides suspendidos. El flujo finalmente, se dio no solo por el agujero, sino a través de toda la muestra.

Por último se presenta una gráfica con las curvas correspondientes a los tres ensayos ejecutados, para evaluar además, la magnitud de los caudales de las muestras contaminadas, respecto al que pasó por el agujero hecho en la muestra natural.

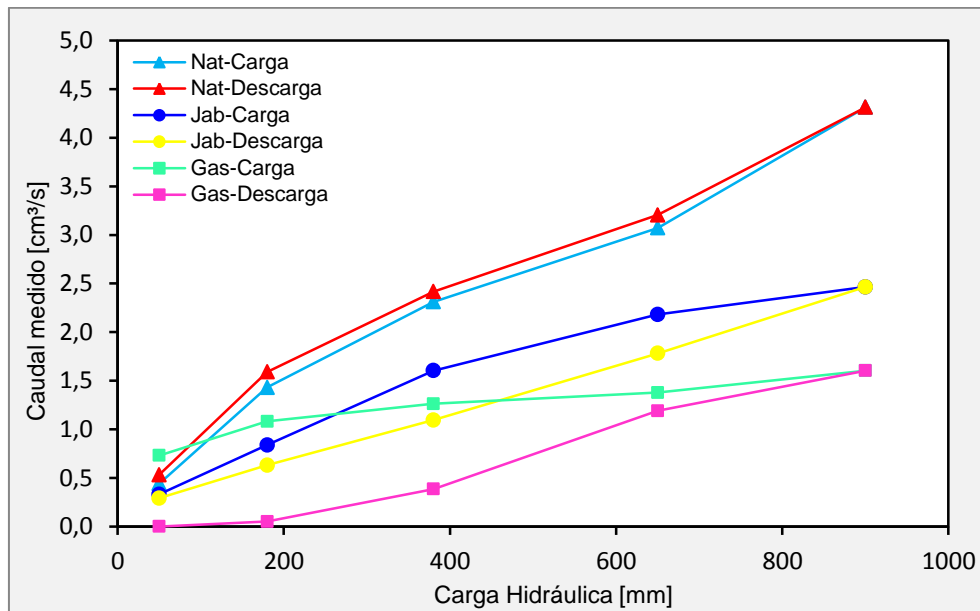


Figura 44. Comparativo de las Curvas Pinhole de todas las muestras.

Puede verse una reducción a la mitad del caudal medido en el caso de la muestra con jabón, comparándola con la muestra natural. Para el espécimen con gasolina dicha reducción es casi a una tercera parte, lo que ubica esta condición como el caso más crítico en lo que se refiere a *Erosión interna*.

4.3.3. Ensayo Crumb

El ensayo Crumb se realizó para estimar la susceptibilidad del suelo ante el fenómeno de *Erosión superficial* o *Dispersión*, o la activación de éste a causa de las sustancias adicionadas al suelo como contaminantes.

Ya que uno de los requerimientos de la norma es que el ensayo sea realizado sobre especímenes secos al aire, se consideró interesante observar el comportamiento y posibles variaciones para muestras secas al horno.

El ensayo se realizó durante las 24 horas sugeridas, sin embargo los resultados seleccionados corresponden a un tiempo de 1 hora, que a partir de ese tiempo no se presentaron variaciones considerables en las pruebas.

Como producto del ensayo se presentan las siguiente fotografías con base en las cuales se procede a definir el grado de dispersión de cada una de las muestras, al compararlas con lo que sugiere la normativa ASTM.

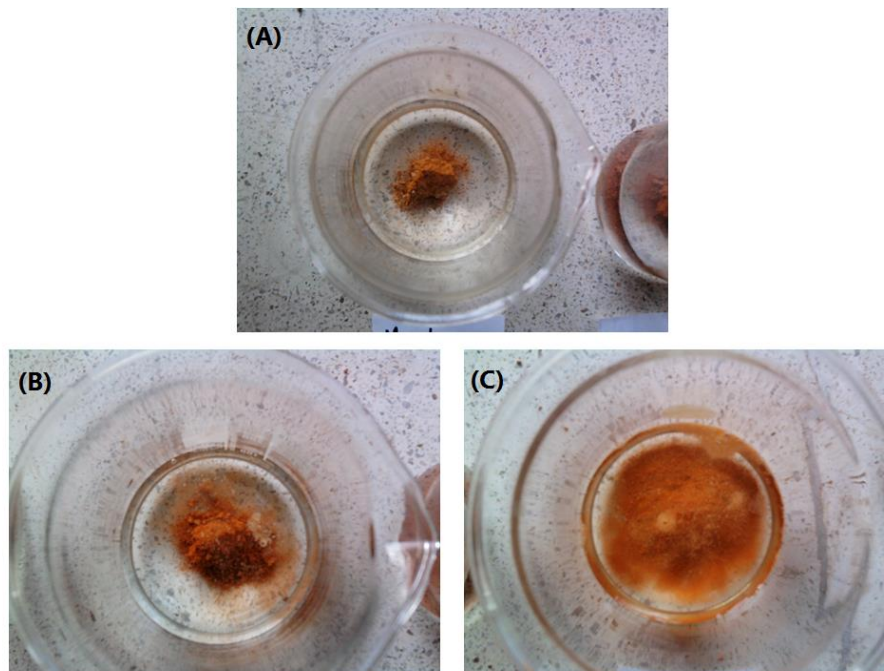


Figura 45. Ensayo Crumb para especímenes secos al aire. $t = 1$ hora.
(A) Nat – (B) Jab – (C) Gas.

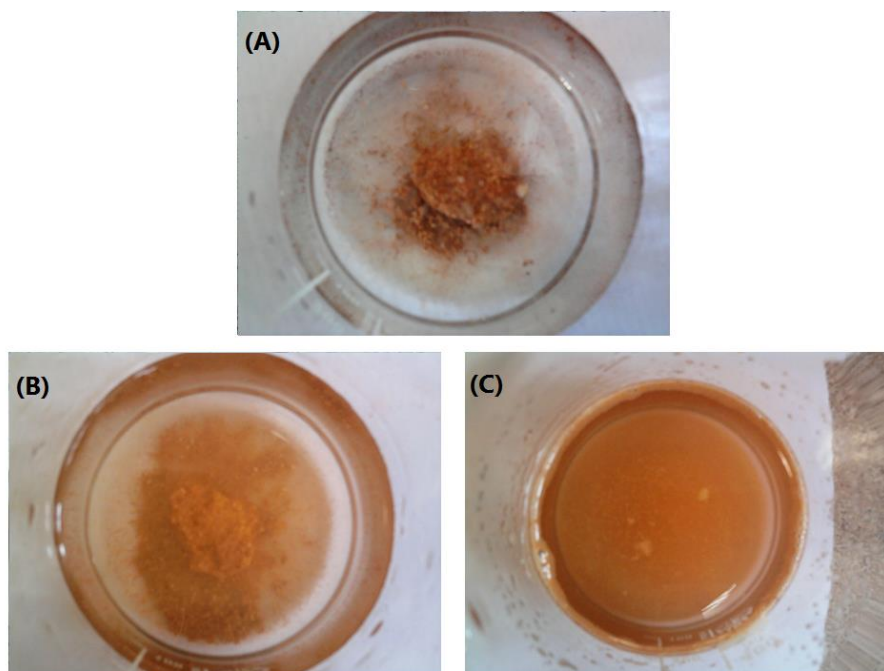


Figura 46. Ensayo Crumb para especímenes secos al horno. $t = 1$ hora.
(A) Nat – (B) Jab – (C) Gas.

En el caso de los especímenes secos al aire, se tiene que la muestra no contaminada presenta un comportamiento que corresponde al Grado I, es decir, un suelo *No dispersivo*. Por su parte, la muestra con jabón presenta distribución en una pequeña parte del fondo del recipiente, por lo que se puede decir que está en el Grado II, suelo *Moderadamente dispersivo*. La muestra contaminada con gasolina se desintegró completamente y presenta coloides en suspensión, lo que la asocia al Grado IV, suelo *Altamente dispersivo*.

Por otro lado, las muestras secas al horno presentan, en general, un cierto aumento en el grado de dispersión. La muestra natural ahora presenta un Grado II, suelo *Moderadamente dispersivo*. La muestra con jabón es un Grado III, suelo *Dispersivo*. La muestra con gasolina es Grado IV aún, pero en este caso la cantidad de coloides es mucho mayor y la turbiedad es tal que no se puede ver el fondo del recipiente.

De esta manera, se justifica la susceptibilidad de la prueba ante el tipo de secado que se le da a las muestras.

5. CONCLUSIONES

5.1. CONSIDERACIONES FINALES DEL TRABAJO

A pesar de las alteraciones hechas al suelo residual estudiado, su respuesta física no fue tal que pudiese llevar a clasificarlo en forma diferente para cada estado de contaminación o secado según los sistemas usados. Sin embargo, no se puede decir que la adición de sustancias perturbadoras o el secado en el momento de los ensayos, no afecta el suelo, pues, en la mayoría de las pruebas de laboratorio que constituyeron la sección de propiedades índice, hubo un rango de variación de los resultados, que de algún modo puede llegar a ser más amplio en función del tiempo de exposición de los especímenes.

Los límites de consistencia presentan mayor sensibilidad ante el secado de los especímenes, que ante las sustancias contaminantes, pues el secado tiende a darle cierto grado de aleatoriedad a los resultados, lo que puede explicarse en virtud de la cantidad de Fósforo soluble que se activa a altas temperaturas para suelos ácidos, como en este caso se verificó con las mediciones de pH realizadas, a pesar de no conocer con exactitud la cantidad de Fósforo contenida por el suelo. Por el lado de los contaminantes, la estructura química de éstos, está tan claramente definida que si es posible observar tendencias en el comportamiento del suelo para cada uno de los casos, con una leve influencia sobre el índice de plasticidad, lo que quiere decir que el suelo tendrá un rango de humedad menor en el que tendrá consistencia firme o dura.

Es evidente que el peso específico de los sólidos no es susceptible a cambios significativos por alteraciones antrópicas a corto plazo, pero quizás lo sea para contaminantes que actúen por periodos de tiempo prolongados, debido a que el rango de variación puede estar directamente relacionado con tiempo de exposición del suelo. Por ello, es una variable a considerar en problemas geotécnicos, por ser la que determina, en función de los minerales presentes, el peso unitario de un suelo. Y a la luz del proceso de meteorización tropical, se sabe que ciertos minerales pueden ser transportados o degradados en el tiempo, y si esto se debe a la acción de fluidos ajenos a la masa de suelo, tiene relación directa con lo que aquí, en una escala más pequeña, se estudió.

La granulometría por su parte, se torna cambiante ante la acción de la gasolina y la sustancia jabonosa, y no precisamente por modificar de alguna forma los tamaños de las partículas, sino porque en el caso de la solución de jabón se generan agregaciones entre los granos más finos, que a pesar de no ser muy fuertes en términos de las uniones catiónicas, de no ser por la sustancia defloculante hubiesen llevado a que se les considerara como partículas de diámetros mayores. En cuanto a la gasolina, su acción está representada por la desagregación de las

concreciones entre partículas deleznable, y la repelencia entre ellas, de modo que se vea aumentado ligeramente el volumen de vacíos en el suelo. Estas afirmaciones están sustentadas por las imágenes SEM, en las que se puede ver con detalle los arreglos microestructurales de las partículas.

La naturaleza limosa propia de los suelos residuales del Batolito Antioqueño, le da validez al resultado del sistema de clasificación USCS, el cual es bastante compatible con el grupo en que se enmarca el suelo con la metodología MCT. Ambos métodos convergen y se complementan en el sentido que se comienza a hablar de un suelo con afinidades al comportamiento de una Laterita, a pesar de no tratarse de un suelo Laterítico como tal. A partir de lo que sugiere el ensayo de pH y de lo observado en los difractogramas, se tienen algunos arcillominerales presentes, que de seguir sometidos a las condiciones de interperismo existentes en la zona de estudio, pueden llegar al último grado de descomposición de un suelo residual tropical.

En términos generales, las propiedades índice del suelo residual estudiado no presentan grandes modificaciones, respecto a las de una muestra en condiciones naturales, cuando se le adicionan sustancias contaminantes, simulando eventuales infiltraciones de hidrocarburos o detergentes, lo que si puede suceder ante un tiempo de exposición mayor. Sin embargo, debe decirse que si al momento de ensayar el suelo en laboratorio no se tiene en cuenta la naturaleza de éste, y se controlan las condiciones de secado de los especímenes, se pueden activar ciertos comportamientos anormales como la pérdida súbita de plasticidad o la rotura de los enlaces creados por intercambio catiónico entre la fracción fina del suelo.

Mineralógicamente, se estima que es difícil alterar la composición del suelo, sin embargo, es sabido que ante la interacción prolongada con fluidos infiltrados, es normal que algunos minerales sean lavados hacia estratos subyacentes por procesos de lixiviación o eluviación.

Definido el concepto de colapso, se afirma que el trabajo estuvo enfocado en el análisis de un suelo colapsable por humedecimiento y sobrecarga, inicialmente planteado como un suelo metaestable, en el que se genera una pérdida parcial o total de las fuerzas de atracción entre partículas por un agente contaminante, que además lubrica las partículas favoreciendo su reacomodación. Con un agente detonante como el agua, que altera el aparente equilibrio en la estructura del suelo, creado por las agregaciones débiles en el caso de la solución jabonosa, y por la estructura no floculada generada por la gasolina. Ambos cambios en la disposición de las partículas ante la acción de los agentes contaminantes fueron observados en las imágenes SEM.

Muy relacionado con la pérdida de plasticidad causada por la naturaleza química de la gasolina, está la disminución de las fuerzas cohesivas por intercambio catiónico, en lo que respecta a los arcillominerales presentes en el suelo, fuerzas que no alcanzan a ser asumidas por las partículas ya defloculadas, ni por la tensión superficial de la gasolina, convirtiendo el suelo en un cuerpo propenso a sufrir el colapso en su microestructura, lo que se activa con el cambio en el estado tensional ejercido en el ensayo duploedométrico, y se asemeja a situaciones ingenieriles reales de trabajo como puede ser: el colapso por desconfinamiento de un talud en corte.

En el caso de la muestra inundada con solución jabonosa, las fuerzas cohesivas también desaparecen, pero su efecto es asumido de manera provisional por las concreciones que forman las sustancias detergentes, actuando como aglutinantes de las partículas de suelo. Sin embargo estos enlaces no son tan fuertes como para soportar las presiones intersticiales generadas en el momento de la saturación, y mayoradas por el aumento en las tensiones aplicadas, llevando también al colapso de la estructura del suelo.

Al determinar cuál de las sustancias usadas es más desfavorable activando el riesgo inminente de colapso en el suelo, debe decirse que es la gasolina, pues los potenciales de colapso estimados para los especímenes afectados por este agente, son los mayores, y ubican el suelo estudiado en un estado de alta vulnerabilidad, ante los problemas geotécnicos, causados en las obras por el colapso.

Finalmente, se afirma con certeza que el suelo residual que se estudió no puede llegar a ser autocolapsable, ni siquiera por la influencia de las sustancias contaminantes usadas, debido a que los esfuerzos de preconsolidación estimados en todos los casos, son considerablemente mayores que la presión ejercida por el peso propio de la columna de material, que soporta en la profundidad de la que se tomaron las muestras. Esto es, que el suelo presenta un comportamiento sobreconsolidado, y de esta manera se espera que no presente colapso bajo su propio peso.

En lo referente a los fenómenos de la Erosión interna o Pipping, y de la Erosión superficial o Dispersión, se tiene que ambos fenómenos son detonados ante la presencia de sustancias contaminantes. Por el lado del secado, la dispersión es altamente susceptible.

Siendo la gasolina y el jabón dos sustancias con pH en la zona ácida, son multiplicadores de la cantidad de sales solubles, lo que hace que los pequeños coloides presenten un comportamiento semejante al de las partículas granulares de mayor tamaño, es decir, que entre las partículas

sucede una atracción electroquímica tan pequeña, que favorece su movimiento, incluso para flujos en regímenes de velocidad bajos.

Los arcillominerales observados en los Difractogramas de las muestras ensayadas, en especial la Gibbsita, pueden llegar a exhibir un comportamiento dispersivo, si en determinado momento, por los fluidos intersticiales, llegasen a contener una gran cantidad de cationes de sodio, como puede ser el caso de la adición de sustancias detergentes, en tanto para su estado no alterado tienen una preponderancia de cationes de calcio, potasio y magnesio en el agua de poros. Es esta la razón, por la que la muestra en estado natural no presenta problemas de erodabilidad, y en presencia de los contaminantes sí da una clara evidencia de ellos.

Para finalizar, desde todo punto de vista, entre los dos casos estudiados, la gasolina es el agente más desfavorable para el comportamiento geotécnico del suelo. Sin embargo, siendo más común en nuestra cotidianidad, la infiltración de sustancias que contienen detergentes en la masa de suelo, por la inadecuada disposición de aguas residuales por ejemplo, deben ser consideradas ambas condiciones en los diseños de obras ingenieriles de mitigación y mejoramiento, que involucren las variables hidromecánicas del suelo.

5.2. RECOMENDACIONES

Sobre las metodologías de laboratorio, empleadas para la estimación de las propiedades índice del suelo, se recomienda que éstas consideren el origen y las características de los especímenes de prueba, pues en el caso de los suelos residuales tropicales, las condiciones de secado pueden llevar a caracterizaciones erróneas.

Asimismo sucede con el ensayo Crumb, que a pesar de sugerir en su norma que se ensayen solo muestras secas al aire, puede ser importante considerar los especímenes secos en el horno, pues eventualmente la exposición del suelo a altas temperaturas, hace que se pueda visualizar la vulnerabilidad ante los fenómenos de erosión superficial.

La determinación de la magnitud del colapso de un perfil de suelo, usada como metodología de clasificación, también es de utilidad en el diseño y construcción de obras de ingeniería en suelos metaestables, sobre todo en la caracterización del terreno de grandes áreas, ya sea en obras lineales como canales o vías, o locales como presas o edificaciones, dado que cada perfil de suelo está caracterizado por un parámetro, lo cual permite el manejo de un número importante de

información. Obviamente, esta metodología también es de gran uso en cualquier tipo de obras, independientemente de su tamaño e importancia.

Dado que el colapso súbito del suelo, puede hacer obsoletos los diseños basados en los asentamientos, es muy importante estar en capacidad de identificar el fenómeno y su probabilidad de ocurrencia.

La activación de la dispersión o la presencia inherente de ésta, hace que el suelo pierda propiedades en lo que se refiere a la construcción de terraplenes, bien sea para carreteras o para obras hidráulicas, por lo que se recomienda evaluar esta propiedad, especialmente en proyectos de tales fines.

Para la mitigación de procesos erosivos hay numerosas alternativas, que van desde las coberturas vegetales, hasta la precipitación de calcificantes. Debe tratarse de acudir a alguno de ellos siempre que sea necesario.

Sería interesante para complementar el alcance de este trabajo, la realización de pruebas de permeabilidad que complementen la caracterización hidromecánica del suelo contaminado. Asimismo, verificar el comportamiento ante otras sustancias como alcoholes y aceites.

5.3. LIMITACIONES

Como limitante principal en la validez de esta investigación, y en general de todos aquellos estudios relacionados con el suelo, se plantea la heterogeneidad del mismo, sumada a que algunos de los ensayos son ejecutados sobre especímenes de tamaño pequeño, que pueden no resultar representativos del comportamiento de toda la masa de suelo.

Además, la manipulación de las muestras, pudo en algún momento, modificar substancialmente su comportamiento, ante los estímulos aplicados al momento de obtener las mediciones de cada prueba.

Finalmente, debe mencionarse también que en el proceso de adición de los agentes contaminantes, pudieron haber quedado zonas con concentraciones no homogéneas de las sustancias, o simplemente considerar el hecho de que el líquido cambie las condiciones inalteradas de la muestra.

6. REFERENCIAS

- Berry, P., & Reid, D. (1993). *An introduction to soil mechanics*. Salford: McGraw Hill International.
- Camapum, J. (2006). *Processos Erosivos no Centro- Oeste Brasileiro*. Brasília: Finatec Ed.
- Cardoso, F. (1995). *Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso*. Dissertação de Mestrado. Brasília.: Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental.
- Da Silva, J. (2006). *Estudo da colapsibilidade da argila porosa de Brasília pelo fluxo de contaminantes*. Dissertação de Mestrado. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental.
- Feininger, T. B. (1985). *Geologic map of Eastern Antioquia Department, Colombia, Scale 1:100.000*. Bogotá: Instituto Nacional de Geología y Minas - USGS.
- Fookes, P. G. (1997). *Tropical Residual Soils*. Londres: The Geological Society.
- Fredlund, D., & Morgenstern, N. (1976). Constitutive relations for volume changes in unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal* Vol.13, 261-267.
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1996). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Guimaraes, E. (1999). Difractometria de raios X. *XXVII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, Brasília*, 49-51.
- Hesse, P. R. (1971). *Total nitrogen in the Kjeldahl process: Soil chemical analysis*. London, United Kingdom: Murray Ed.
- Hoyos, F. (2001). *Diccionario básico de Geotecnia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. (2011). Recuperado el 15 de Marzo de 2013, de http://www.igac.gov.co/igac_web/contenidos

- Instituto Nacional de Geología y Minas.* (2007). Recuperado el 16 de Marzo de 2013, de Plancha 147: <http://www.ingeminas.gov.co/Geologia>
- Iribarne, J., & Godson, W. (1973). *Atmospheric thermodynamics*. Dordrecht, Holland: Reidel Publishing Company.
- Jennings, J., & Knight, K. (1975). A guide to Construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *VI Regional conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Durban*, 99-105.
- Kiehl, E. (1979). *Manual de edafología*. Sao Paulo, Brasil: Agronômica Ceres.
- Moll, L. (1975). Analysis of the problem from collapsible soils. *V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Buenos Aires, Argentina.*, 359-370.
- Municipio de Guarne.* (2007). Recuperado el 13 de Marzo de 2013, de <http://www.guarne-antioquia.gov.co>
- Nogami, J., & Villibor, D. (1994). Identificacao expedita dos grupos da classificacao MCT para solos tropicais. *X Congresso Brasileiro de Mecanica dos solos e Engenharia de Fundacoes. Foz do Iguacu, Vol 4.*, 1293-1300.
- Nogami, J., & Villibor, D. (1995). *Pavimentacao de baixo custo com solos lateriticos*. Sao Paulo: Ed. Villibor.
- Oliveira, E. (2005). *Cadastro georrefenciado de erosões no Distrito Federal. Dissertacao de Mestrado*. Brasilia: Universidade de Brasilia, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental.
- Sandroni, S. (1981). Solos residuais pesquisas realizadas na PUC-RJ. *Proceedings of the Symposium engineering of tropical soils*, 30-35.
- Santos, P. (1975). *Tecnologias de argilas aplicadas às argilas brasileiras. Vol 1*. Sao Paulo, Brasil: Ed Edgard Blucher.
- Skempton, A. (1953). The colloidal activity of clays. *III International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceedings Vol 1. Switzerland*, 57-60.
- Sposito, G. (1981). *The thermodynamics of soil solutions*. Oxford, United Kindom: Clarendon.
- Valencia, Y. (2009). *Influencia da biomineralizacao nas propriedades fisico - mecanicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Tese de Doutorado*. Brasília: Universidade de Brasilia, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental.