

**INFLUENCIA DE LA METEORIZACIÓN EN
LAS PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO
DE DOS PERFILES DE ALTERACIÓN
ORIGINADOS DE ROCAS METAMÓRFICAS**

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ



**Director
MARCO ANTONIO MÁRQUEZ GODOY (UN)
Co-directores
JOSE CAMAPUM DE CARVALHO (UnB)
MANUEL ROBERTO VILLARRAGA (UN)**

**Maestría en Ingeniería Geotecnia
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín
2005**

DEDICATORIA

A mi padre Pedro, mi madre Martha y mi hermana Mónica, por apoyarme incondicionalmente y muy especialmente, al Profesor Fabián Hoyos Patiño por creer y confiar en mi siempre.

AGRADECIMIENTOS

Posgrado de Ingeniería – Área Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; pero en especial al Profesor Fabián Hoyos Patiño, por su colaboración en todo lo requerido para la realización de esta investigación y su gran apoyo en lo referente a mi viaje a la ciudad de Brasilia (BR).

Al profesor Marco Antonio Márquez, por su colaboración, dedicación y aporte de conocimientos durante toda la investigación y por confiar en mis capacidades y dar su palabra por mi en Brasil.

A los Laboratorios: Geotecnia, Carbones, Yacimientos y Fluidos de perforación, Láminas delgadas e Impregnación, Microscopía avanzada y Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia y al laboratorio de Geotecnia de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, por los servicios prestados en la realización de los ensayos de la investigación y a sus encargados como Libardo Gómez, (I.P) Pablo y Mauricio, (I.A) Medardo Pérez, (I.G) Jacqueline Espinosa y de forma muy especial a (I.M) Martha Salazar por su continua y constante disposición.

A la Universidad de Brasilia – Posgrado en Geotecnia, por aceptarme dentro de un convenio de cooperación y facilitarme su laboratorio para la realización de varios ensayos y a sus laboratoristas, Vanilson, Ricardo, Alexandro y Pablo.

Al profesor José Camapum de Carvalho, quien desinteresadamente y con mucha paciencia y dedicación, me acogió como su alumna en la Universidad de Brasilia, me asesoró de forma oportuna y acertada y del cual aprendí muchas cosas en el campo profesional y personal.

Al laboratorio de Difractometría de rayos-X del Instituto de Geociencias de la Universidad de Brasilia, en especial a su directora Edi Mendes.

A la Empresa FURNAS de Brasil, pero muy especialmente a la estudiante de Maestría de la Universidad Federal de Goiania, Ana Livia, por su valioso aporte en la realización e interpretación de parte de los ensayos de microscopía electrónica de barrido.

Al profesor Manuel Roberto Villarraga Co-director de la investigación, por sus invaluable aportes y orientaciones.

A mi profesor, compañero y amigo Oscar Echeverri, quien fue mi apoyo, compañía y guía, para llegar hasta el final.

A los estudiantes de Ingeniería Geológica Fabián Paniagua y Milton Álvarez, por su valiosa colaboración en la impregnación e interpretación petrográfica de las secciones respectivamente.

A los profesores Marion Weber y Norberto Parra, por tener sus laboratorios siempre a nuestra disposición.

A la Sociedad Colombiana de Geotecnia, por su apoyo económico.

A la Empresa INDURAL S.A. y el Eco – parque El Volador, por permitir el acceso a sus localidades.

A todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

RESUMEN

Los suelos tropicales son suelos que presentan características geotécnicas especiales, las cuales son influenciadas por el grado de meteorización, su génesis, sus características estructurales y sus propiedades químicas y mineralógicas entre otras. Los trabajos en el área de geotecnia de suelos tropicales en Antioquia, especialmente en formaciones metamórficas, que se encargan de estudiar las relaciones existentes entre el comportamiento mecánico de estos materiales y sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, son pocos. Es por ello, que esta tesis tiene como principal objetivo, analizar la influencia que tiene la meteorización en las propiedades físico-químicas y mineralógicas, en la microestructura y en el comportamiento geotécnico de los suelos residuales que componen dos perfiles originados de rocas metamórficas. Para tal fin, se tomaron muestras de la roca parental y de tres niveles diferentes del perfil de meteorización; a estos niveles, se les hicieron ensayos de clasificación física (determinación de la humedad natural, gravedad específica, límites de Atterberg, análisis granulométrico y porosidad), clasificación química (análisis químicos), análisis mineralógico (por difracción de rayos-X, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido) y caracterización mecánica (ensayo de compresión simple, cizallamiento directo, compresión confinada, succión y tracción indirecta). Posteriormente, fueron correlacionados los resultados para analizar el efecto de los cambios mineralógicos en las propiedades y comportamiento de estos perfiles.

ABSTRACT

The tropical soils are materials that present special geotechnical characteristics, which are influenced by meteorization degree, genesis, structural characteristics and chemical and mineralogical properties among others. The Geotechnics works on tropical soils in Antioquia, are few specially in metamorphic formation that are in charge of studying relationships between the mechanical behavior of these materials and their physical, chemical and mineralogical properties. For that reason, the main objective of this research is to analyze to the influence of meteorization in the physical-chemical and mineralogical properties and in the microstructure and the behavior geotechnic of the residual soils that compose two originated profiles of metamorphic rocks, the “gneiss of the Iguañá” and the “amphibolites of Medellín”. For this purpose, were taken samples from the parental rock and of the three different levels from the profile of meteorization, at these levels, were made tests of physical classification (determination of the natural humidity, specific gravity, limits of Atterberg, grain sized analysis and porosity), chemical classification (chemical analyses), mineralogical analysis (by diffraction of rays-X, optical microscopy and scanning electronic microscope) and mechanical characterization (test of simple compression, direct shear, confined compression, suction and indirect traction). Later, the results were correlated to analyze the effect of mineralogy changes in the properties and behavior of these profiles.

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
FIGURA 2.1	Procesos pedogenéticos globales	3
FIGURA 2.2	Esquema del manto de meteorización en zonas tectónicamente inactivas	4
FIGURA 2.3	Ciclo de las rocas	6
FIGURA 2.4	Transición típica en la mineralogía que se produce por metamorfismo progresivo de la lutita	8
FIGURA 2.5	a) Estructura básica de los filosilicatos - tetraedros, b y c) Hexágonos de tetraedros, d y e) octaedros	11
FIGURA 2.6	Análisis composicional de los suelos	14
FIGURA 2.7	Condiciones geométricas para difracción de rayos-X de acuerdo con la Ley de Bragg	15
FIGURA 2.8	Termograma de una arena arcillosa	16
FIGURA 3.1	Mapa localización perfiles de estudio	24
FIGURA 4.1	Ubicación de los papeles de filtro sobre los cuerpos de prueba	35
FIGURA 4.2	Ensayo de tracción indirecta	37
FIGURA 4.3	Cohesión aparente	38
FIGURA 5.1	Gs de perfiles originados de rocas metamórficas e ígneas	40

		Pág.
FIGURA 5.2	Variación de w_l , b) Variación de w_p , c) Variación de l_p , d) Variación w_n con la profundidad	41
FIGURA 5.3	Variación de e_o con la profundidad	42
FIGURA 5.4	a) Relación entre w_l y w_p con e_o para el perfil originado del neis de la Iguaná, b) Relación entre w_l y w_p con e_o para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín	42
FIGURA 5.5	Relación entre e_o y e_l	43
FIGURA 5.6	a) Variación granulometría – neis de la Iguaná, b) Variación granulometría – anfibolitas de Medellín, c) Granulometría perfiles originados de rocas metamórficas	44
FIGURA 5.7	a) Granulometría nivel 1, b) Granulometría nivel 2 y c) Granulometría nivel 3 de perfiles originados de rocas metamórficas e ígneas	46
FIGURA 5.8	a) Granulometría nivel 1, b) Granulometría nivel 2 y c) Granulometría nivel 3 neis Iguaná – Método Granulómetro Láser y Convencional	47-48
FIGURA 5.9	a) Granulometría nivel 1, b) Granulometría nivel 2 y c) Granulometría nivel 3 anfibolitas de Medellín – Método Granulómetro Láser y Convencional	48-49
FIGURA 5.10	a) Distribución tamaño de poros, b) Distribución acumulada de poro perfil originado del neis de la Iguaná	49-50
FIGURA 5.11	a) Distribución tamaño de poros, b) Distribución acumulada de poro perfil originado de las anfibolitas de Medellín	50
FIGURA 5.12	a) Relación $w_b - w_l$ neis de la Iguaná, b) Relación w_b – w_l perfil anfibolita de Medellín	52

	Pág.
FIGURA 5.13	a) Relación entre %Al - %B, perfil originado del neis de la Iguaná, b) Relación entre %Al - %B, perfil originado de las anfibolitas de Medellín 53
FIGURA 5.14	a) Clasificación EMBRAPA, b) Clasificación Skepmtton 54
FIGURA 5.15	Relación entre w_l , w_p , I_p y pH (KCl) - pH (agua), perfil originado del neis de la Iguaná 54
FIGURA 5.16	Relación entre w_l , w_p , I_p y pH (KCl) - pH (agua), perfil originado de las anfibolitas de Medellín 54
FIGURA 5.17	Variaciones químicas de los perfiles originados del neis de la Iguaná 55
FIGURA 5.18	Variaciones químicas de los perfiles originados de las anfibolitas de Medellín 56
FIGURA 5.19	Drifractograma del perfil originado del neis de la Iguaná 57
FIGURA 5.20	Drifractograma perfil originado de las anfibolitas de Medellín 57
FIGURA 5.21	a) Variación de las proporciones relativas de los minerales con la profundidad para el perfil originado del neis de la Iguaná, b) Variación de las proporciones relativas de los minerales con la profundidad para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín 59
FIGURA 5.22	Vista general y microanálisis nivel 1 neis de la Iguaná 70
FIGURA 5.23	Vista general y microanálisis nivel 2 neis de la Iguaná 71
FIGURA 5.24	Vista general y microanálisis nivel 3 neis de la Iguaná 72
FIGURA 5.25	Vista general y microanálisis nivel 1 anfibolitas de Medellín 73

	Pág.	
FIGURA 5.26	Vista general y microanálisis nivel 2 anfibolitas de Medellín	74
FIGURA 5.27	Vista general y microanálisis nivel 3 anfibolitas de Medellín	75
FIGURA 5.28	a) nivel 1, b) nivel 2 y c) nivel 3 neis de la Iguaná	76
FIGURA 5.29	a) nivel 1, b) nivel 2 y c) nivel 3 anfibolitas de Medellín	77
FIGURA 5.30	Imagen falla neis nivel 1	78
FIGURA 5.31	Imagen falla neis de la Iguaná nivel 2	78
FIGURA 5.32	Imagen falla neis de la Iguaná nivel 3	79
FIGURA 5.33	Roca neis de la Iguaná	79
FIGURA 5.34	Nivel 1 falla anfibolitas de Medellín	80
FIGURA 5.35	Nivel 2 falla anfibolitas de Medellín	80
FIGURA 5.36	Nivel 3 falla anfibolitas de Medellín	81
FIGURA 5.37	Roca anfibolita de Medellín	81
FIGURA 5.38	Relación entre $(u_a - u_w)$ y E – Perfiles metamórficos	82
FIGURA 5.39	Relación entre $(u_a - u_w)$ y q_u – de los dos perfiles metamórficos	83
FIGURA 5.40	a) Relación de c^* y succión - Perfil originado del neis de la Iguaná, b) Relación de c y succión - Perfil originado de las anfibolitas de Medellín	84
FIGURA 5.41	a) Resistencia al cizallamiento - Perfil originado del neis de la Iguaná, b) Resistencia al cizallamiento - Perfil originado de las anfibolitas de Medellín	84
FIGURA 5.42	a) Curva presión – relación de vacíos (normalizada) para el perfil originado del neis de la Iguaná, b) Curva presión – relación de vacíos (normalizada) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín	86

	Pág.
FIGURA 5.43 Índice de compresión (C_c) y Relación de vacíos inicial (e_0) para los dos perfiles metamórficos	85
FIGURA 5.44 Presión aparente de consolidación	86
FIGURA 5.45 Identificación de suelos colapsibles en las dos formaciones	88
FIGURA 5.46 Curva característica en función de la humedad (w) para el perfil originado del neis de la Iguaná	88
FIGURA 5.47 Curva característica en función de la saturación (S_r) para el perfil originado del neis de la Iguaná	88
FIGURA 5.48 Curva característica en función de la humedad (w) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín	88
FIGURA 5.49 Curva característica en función de la saturación (S_r) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín	89
FIGURA 5.50 Curvas características en función de la humedad (w) para los perfiles metamórficos	90
FIGURA 5.51 a) $(u_a - u_w) - \sigma_t$, b) $w (\%) - \sigma_t$ – Perfil originado del neis de la Iguaná	90
FIGURA 5.52 a) $(u_a - u_w) - \sigma_t$, b) $w (\%) - \sigma_t$ – Perfil originado de las anfibolitas de Medellín	90
FIGURA 5.53 a) $(u_a - u_w) - c$ – Perfil originado del neis de la Iguaná, b) $(u_a - u_w) - c$ – Perfil originado de las anfibolitas de Medellín	91
FIGURA 5.54 $(u_a - u_w) - \phi^b$ – Perfil originado del neis de la Iguaná	91
FIGURA 5.55 $(u_a - u_w) - \phi^b$ – Perfil originado de las anfibolitas de Medellín	92

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
TABLA 2.1	Rocas metamórficas comunes	7
TABLA 2.2	Capacidad de intercambio catiónico típicas de los minerales de arcilla	9
TABLA 2.3	Gravedad específica de varios minerales	10
TABLA 2.4	Perfil de meteorización del macizo rocoso	20
TABLA 2.5	Clasificación según Brand	21
TABLA 4.1	Clasificación MCT rápida	30
TABLA 4.2	Clasificación MCT y diversos grupos de suelos integrados	31
TABLA 5.1	Valores de e_0 , e_1 y n para los perfiles de origen metamórfico	43
TABLA 5.2	Clasificación de los perfiles	51
TABLA 5.3	Análisis químico y Actividad del neis de la Iguaná y anfibolitas de Medellín	53
TABLA 5.4	Minerales presentes en los dos perfiles metamórficos y sus proporciones relativas	58
TABLA 5.5	Intensidades de Alteración según I.A.	61
TABLA 5.6	Intensidades de Alteración en los dos perfiles metamórficos	61
TABLA 5.7	Descripción de minerales del neis de la Iguaná utilizando microscopio petrográfico	63
TABLA 5.8	Descripción de minerales de las anfibolitas de Medellín utilizando microscopio petrográfico	66

		Pág.
TABLA 5.9	Resultados ensayo compresión simple	82
TABLA 5.10	Resultados ensayo de cizallamiento directo	83
TABLA 5.11	Resultados ensayos consolidación	85
TABLA 5.12	Clasificación física, química, mineralógica, microestructural y mecánica de los dos perfiles metamórficos.	93

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
FOTO 4.1 Perfil neis de la Iguaná	25
FOTO 4.2 Perfil anfibolitas de Medellín	26
FOTO 4.3 Granulómetro Láser del laboratorio de Geotecnia UnB	27
FOTO 4.4 Poresizer del Laboratorio de yacimientos y fluidos de perforación-UN	28
FOTO 4.5 Secado al aire de pastillas y bolas de suelo método MCT	29
FOTO 4.6 Penetración de las pastillas con el penetrómetro	30
FOTO 4.7 Difractómetro RIKAGU del laboratorio de Difractometría de rayos-X, UnB	32
FOTO 4.8 Ensayo de compresión simple	33
FOTO 4.9 Cuerpos de prueba secados al aire	35
FOTO 4.10 Cuerpos de prueba humedecidos	35
FOTO 4.11 Sellado de los cuerpos de prueba	36
FOTO 4.12 Pesada papel filtro	36
FOTO 4.13 Determinación de peso específico	37
FOTO 4.14 Ensayo de tracción directa	38
FOTO 4.15 Cuerpo fallado por tracción directa	38
FOTO 5.1 Cuarzo – nivel 1, neis de la Iguaná	63
FOTO 5.2 Feldespato potásico (nicoses cruzados) – nivel 1, neis de la Iguaná	63
FOTO 5.3 Óxidos y minerales de arcilla – nivel 1, neis de la Iguaná	63
FOTO 5.4 Cuarzo – nivel 2, neis de la Iguaná	63
FOTO 5.5 Feldespato (nicoses cruzados) – nivel 2, neis de la Iguaná	63

	Pág.
FOTO 5.6 Óxidos y minerales de arcilla – nivel 2, neis de la Iguaná	64
FOTO 5.7 Cuarzos y plagioclasas – nivel 3, neis de la Iguaná	64
FOTO 5.8 Óxidos de hierro – nivel 3, neis de la Iguaná	64
FOTO 5.9 Cuarzo – Roca, neis de la Iguaná	65
FOTO 5.10 Feldespato potásico – Roca, neis de la Iguaná	65
FOTO 5.11 Plagioclasa (nicos cruzados) – Roca, neis de la Iguaná	65
FOTO 5.12 Anfíboles (nicos cruzados) – nivel 1, anfibolitas de Medellín	66
FOTO 5.13 Óxidos y minerales de arcilla – nivel 1, anfibolitas de Medellín	66
FOTO 5.14 Anfíboles, arcillas y óxidos – nivel 2, anfibolitas de Medellín	67
FOTO 5.15 Hornblenda – nivel 3, anfibolitas de Medellín	67
FOTO 5.16 Sausurita – nivel 3, anfibolitas de Medellín	68
FOTO 5.17 Óxidos y arcillas – nivel 3, anfibolitas de Medellín	68
FOTO 5.18 Hornblenda, plagioclasas, esfenas y óxidos – Roca, anfibolitas de Medellín	69

ANEXOS

- Anexo 1** a) Análisis químico perfiles del neis de la Iguaná, b) Análisis químico perfiles metamórficos
- Anexo 2** Caracterización física perfiles 2 y 3 del neis de la Iguaná y las anfibolitas de Medellín
- Anexo 3** Difractogramas perfiles principales neis de la Iguaná y anfibolitas de Medellín
- Anexo 4** Valores de c y ϕ por cizallamiento directo con los puntos residuales
- Anexo 5** Mapa composicional nivel 1 – anfibolitas de Medellín

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 GÉNESIS DEL SUELO	2
2.1.1 Factores que contribuyen a la formación del suelo	3
2.1.1.1 Clima	3
2.1.1.2 Material parental	5
2.1.1.3 Topografía y drenaje	8
2.1.1.4 Vegetación	8
2.2 MINERALOGÍA, FÁBRICA Y MICROESTRUCTURA DE LOS SUELOS	9
2.2.1 Mineralogía	13
2.2.2 Fábrica	14
2.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS MINERALÓGICO	15
2.3.1 Difracción de rayos-X	16
2.3.2 Análisis térmico	17
2.3.3 Microscopio electrónico de barrido	17
2.3.4 Microscopía óptica	17
2.3.5 Fluido de electrolito en los poros	18
2.3.6 Determinación del pH	18
2.4 METEORIZACIÓN	19
2.4.1 Meteorización física	19
2.4.2 Meteorización química	22
2.5 CLASIFICACIÓN DE UN PERFIL DE METEORIZACIÓN	
2.6 COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO	
CAPÍTULO 3. GENERALIDADES	23
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	25
4.1 TOMA DE MUESTRAS	25

	Pág.
4.2	ENSAYOS 26
	4.2.1 Caracterización física 26
	4.2.1.1 Determinación de la humedad natural 26
	4.2.1.2 Determinación de la gravedad específica 27
	4.2.1.3 Determinación de los Límites de Atterberg 27
	4.2.1.4 Análisis granulométrico 27
	4.2.1.5 Determinación de la porosidad 28
	4.2.2 Clasificación de los suelos 28
	4.2.2.1 Clasificación según la Norma BS 5930 y Brand 29
	4.2.2.2 Clasificación Unificada (U.S.C) 29
	4.2.2.3 Clasificación MCT (Miniatura Compactada Tropical) rápida 29
	4.2.3 Caracterización química 31
	4.2.4 Caracterización mineralógica 31
	4.2.4.1 Difracción de rayos-X 32
	4.2.4.2 Microscopía óptica 33
	4.2.4.3 Microscopía electrónica de barrido “Scannig Electron Microscopy” (SEM) 33
	4.2.5 Caracterización mecánica 34
	4.2.5.1 Ensayo de compresión simple 34
	4.2.5.2 Ensayo de cizallamiento directo 34
	4.2.5.3 Compresión confinada 34
	4.2.5.4 Determinación de las curvas características 37
	4.2.5.5 Ensayo de tracción indirecta o diametral (point load test – Ensayo Brasileiro) 38
<hr/>	
	CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS 40
5.1	Gravedad específica (Gs) 40
5.2	Límites de Atterberg y humedad natural 41
5.3	Relación de vacíos 42
5.4	Análisis granulométrico 43
	5.4.1 Granulometría mecánica y por sedimentación 44
	5.4.2 Granulometría a partir del granulómetro láser 47
5.5	ENSAYO DE POROSIDAD 49
5.6	CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES 51
5.7	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA 52
5.8	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA 56
	5.8.1 Difracción de rayos-X 56
	5.8.2 Microscopía óptica 62
	5.8.3 Microscopía electrónico de barrido “Scannig Electrón Microscope” (SEM) 70
5.9	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA 82
	5.9.1 Compresión simple 82
	5.9.2 Cizallamiento directo 83

5.9.3	Compresión confinada	85
5.9.4	Curvas características	87
5.9.5	Ensayo de tracción indirecta o diametral	90

		Pág.
5.10	CARACTERIZACIÓN FINAL DE LOS PERFILES	92
CAPITULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		95
CAPITULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		99

1. INTRODUCCIÓN

Varios estudios se han realizado sobre los suelos tropicales para buscar solución a problemas geotécnicos. Las características de estas formaciones, altamente influenciadas por aspectos climáticos (altas precipitaciones y temperaturas), geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, tipo de suelo, protección superficial, han dificultado la definición de sistemas de clasificación y de técnicas y métodos de ensayos apropiados para abordar los problemas regionales.

Las zonas tropicales (de alta pluviosidad y ambientes cálidos) proporcionan condiciones óptimas para los procesos de meteorización físico-química, originando grandes espesores de suelos, con alta porosidad y presencia de cementantes por acción química. La acción diferenciada de la meteorización y la gran diversidad de rocas, generan una amplia cantidad de perfiles de meteorización, que asociados a los aspectos mineralógicos, entre otros factores, hacen que las propiedades de estos suelos presenten una enorme variedad, de ahí la necesidad de estudiarlos de forma más detallada. También es de gran importancia tener en cuenta que la gran mayoría de estos suelos se encuentran parcialmente saturados, lo cual tiene gran influencia para el comportamiento geotécnico, ya que los cambios de volumen, la resistencia al corte y el flujo del agua en el suelo, requieren un tratamiento diferente si se tiene un suelo saturado o un suelo parcialmente saturado (Fredlund, 2003).

Es frecuente que en las investigaciones sobre los suelos residuales se resalte la importancia de factores que intervienen en la meteorización como la mineralogía (proporción de minerales de arcilla, óxidos de Fe y Mn, presencia de agregados, etc.), cambios en el pH, la capacidad de intercambio catiónico; sin embargo, no es común encontrar cuantificaciones de la incidencia real de estos en las propiedades mecánicas, lo cual es de vital importancia para prever el comportamiento de estos suelos, dar luces acerca de los mecanismos que gobiernan la inestabilidad de taludes en regiones tropicales, como herramienta de trabajo en el análisis y diseño geotécnico.

El análisis y cuantificación de la influencia de la mineralogía, la microestructura y su alteración por meteorización, en el comportamiento y propiedades geotécnicas de los suelos residuales que componen dos perfiles originados de rocas metamórficas, como son el neis de la Iguañá y las anfibolitas de Medellín, son aspectos que incluye esta investigación y amplían el conocimiento de estos suelos.

2. MARCO TEÓRICO

En las últimas décadas las investigaciones sobre los suelos residuales en regiones tropicales se han incrementado notablemente, debido a que presentan propiedades de ingeniería particulares, diferentes a aquellos suelos de regiones templadas (Fredlund, 2003).

Las características geotécnicas de los suelos tropicales según Camapum (2004), son influenciadas por:

- Su génesis
- Grado de alteración
- Propiedades químicas y mineralógicas
- Características estructurales
- Humedad/ grado de saturación

2.1 GÉNESIS DEL SUELO

Existen múltiples definiciones para establecer el concepto de suelo, pero el propuesto por *Soil Science Society of America* (1984), abarca la gran mayoría de definiciones, denominando suelo al “material mineral no consolidado en la superficie de la tierra que difiere del material del cual se derivó en varias propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas y que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales tales como: material parental, clima, macro y microorganismos y topografía, todos actuando durante un lapso de tiempo”.

La rama de la ciencia que se encarga del estudio de los procesos y factores que le han dado las características y propiedades al suelo se conoce como Pedogénesis o Génesis de los suelos; en ella también se trata de establecer el origen del suelo y los posibles cambios que puede presentar, si varían las condiciones bajo las cuales ha evolucionado (Jaramillo, 2002).

Según Jaramillo (2002), los procesos pedogenéticos son los que definen directamente las características y propiedades que diferenciarán los distintos suelos. El principal proceso pedogenético es la estructuración, que implica aglutinar las partículas individuales que componen los sólidos del suelo en estructuras complejas y mantenerlas unidas a través del tiempo, dándole identidad al suelo. A nivel global se pueden agrupar los procesos de acuerdo con el efecto que producen en el suelo, así: *adiciones* o aportes al suelo, es decir, las entradas

que tiene el mismo; *transformaciones*, que son los procesos que implican cambios en las formas originales de cualquiera de los componentes del suelo; *translocaciones*, que son todos los movimientos de materiales que se producen dentro del suelo, siempre y cuando no se desplacen fuera del mismo, y *pérdidas* que consisten en la extracción o remoción definitiva de cualquier componente del suelo (Figura 2.1).

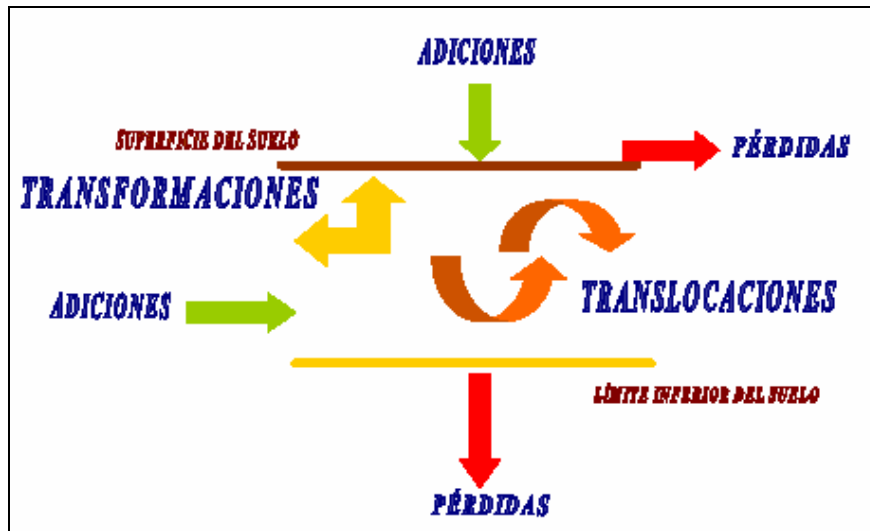


Figura 2.1. Procesos pedogenéticos globales. (Jaramillo, 2002; modificado de Birkeland, 1980).

2.1.1 Factores que contribuyen a la formación del suelo

En la formación del suelo interactúan el clima, material parental, vegetación (en ella cabe la actividad microbiológica), topografía, drenaje y tiempo durante el cual han actuado los procesos pedogénicos (Jaramillo, 2002).

2.1.1.1 Clima

El clima (precipitación y temperatura) es el principal agente en la formación de los suelos, al propiciar y agilizar las diversas reacciones químicas de la meteorización. La precipitación provee el agua necesaria para los procesos químicos y facilita el transporte de los productos solubles, mientras la temperatura incide en la velocidad de las reacciones. Las zonas tropicales donde priman las altas temperaturas y precipitaciones, son los ambientes más apropiados para la formación de suelos residuales (Camapum, 2004).

Estudios adelantados por diferentes investigadores (Peltier, 1950; Gidigasú, 1976) han planteado la relación directa existente entre las condiciones climáticas (precipitación y temperatura) y el desarrollo de la meteorización física y química de las rocas. En la Figura 2.2 se presenta el esquema de los diferentes ambientes de meteorización propuesto por Strakhov (1967), puede observarse como las diferentes zonas climáticas y de vegetación están asociadas con diferentes

intensidades de meteorización. En las zonas de baja temperatura y humedad (tundra, desierto polar), la meteorización es leve, al igual que la descomposición de materia orgánica que acompañada de una escasa precipitación, unida al congelamiento permanente, inhiben los procesos de lixiviación, consecuentemente se presenta solo una ligera alteración de la roca. En la zona de desierto polar (Podzol), la alta humedad promueve la filtración, mientras las bajas temperaturas poco ayudan a la descomposición de la materia orgánica (la velocidad de descomposición es relativamente baja, pero el manto meteorizado alcanza algunos metros de espesor). La alta temperatura de las zonas desérticas, favorece la meteorización física (cambios bruscos de temperatura), pero por la ausencia de lluvia los productos finales se reducen a yeso y carbonatos, la meteorización química no se da o se da incipientemente y la alteración de la roca es escasa. En los bosques tropicales, la alta temperatura y humedad ayudan al desarrollo rápido de la meteorización química y a la movilización efectiva de los constituyentes solubles; comparativamente, en las zonas tropicales se alcanzan los mayores espesores de suelo residual. En la zona de bosques tropicales, la filtración del agua a través de las capas superficiales ayuda a la disolución y movilización de óxidos de hierro y aluminio, pero al decrecer la lixiviación con la profundidad, la sílica retenida se combina con alúmina para formar caolinita; a mayores profundidades se encuentran montmorillonitas e ilitas. En el podzol, los perfiles de meteorización, aunque de menor espesor, son similares a los de los bosques tropicales.

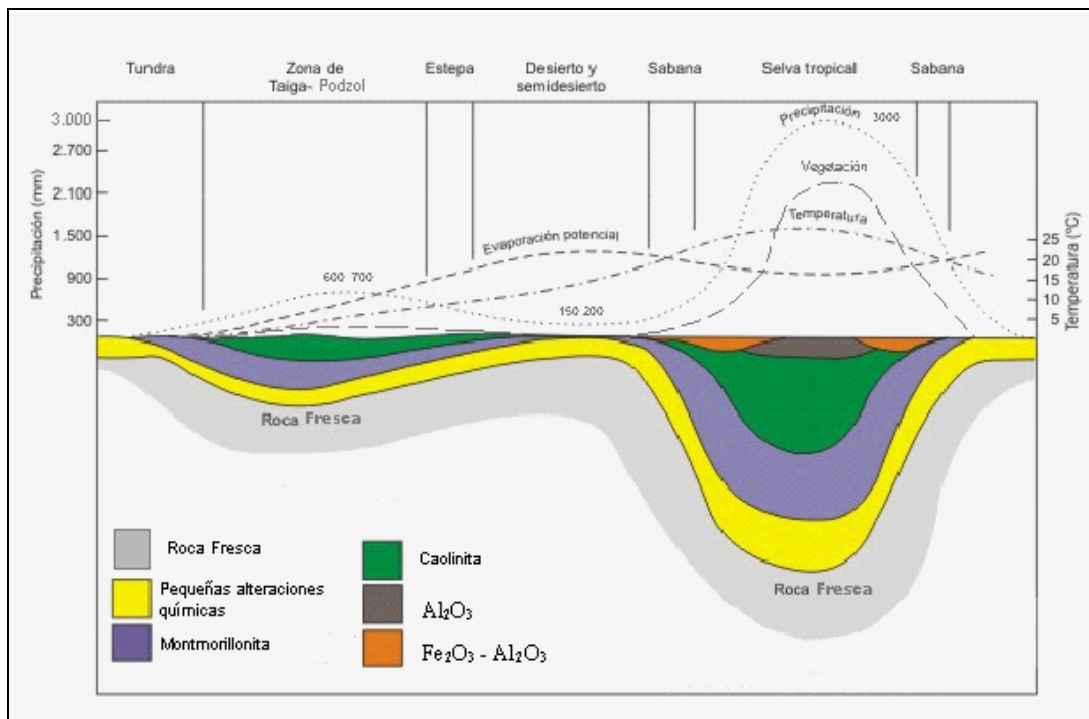


Figura 2.2. Esquema del manto de meteorización en zonas tectónicamente inactivas. (Strakhov, 1967, citado por Fookes, 2004).

Jaramillo (2002), con base en la revisión planteada por Mejía (1981), acerca del efecto del clima sobre las propiedades de los suelos determina que los incrementos de la precipitación aumentan los contenidos en materia orgánica y partículas de tamaño arcilla en el suelo, al igual que la profundidad a la cual se acumulan los carbonatos. Además, debido a que empieza a generarse un exceso de agua en el suelo, se incrementa la lixiviación de bases y la formación de arcillas de baja actividad; los contenidos de bases, aluminio e hidrógeno, y la capacidad de intercambio catiónico cambian radicalmente después de ciertos valores de precipitación.

La temperatura tiene gran influencia en los contenidos de materia orgánica y de nitrógeno, que disminuyen drásticamente con su incremento, este comportamiento se manifiesta siempre y cuando los demás factores de formación se presenten en condiciones similares, dejando variable solamente el clima (Jaramillo, 2002).

Debido a que en Colombia predominan las condiciones de clima cálido y húmedo, es de esperarse (aunque depende del tipo de roca) que la mayor parte de los suelos estén caracterizados por contenidos altos de arcillas de baja actividad, bajos contenidos de bases y valores bajos de capacidad de intercambio catiónico (CIC).

2.1.1.2 Material parental

Se conoce como material parental a la roca a partir de la cual se ha formado un suelo (Hoyos, 2001). En la formación de las rocas intervienen múltiples agentes y procesos (Figura 2.3) y la acción de la meteorización (física y química) sobre ellas da lugar a gran cantidad de suelos, con características y propiedades particulares. En esta figura se observa, como el magma (material fundido) se forma al interior de la Tierra el cual acaba por enfriarse y solidificarse dando origen a las rocas ígneas. Estas rocas si afloran en la superficie experimentan meteorización, desintegrándose, permitiendo su transporte y sedimentación, estos sedimentos se litifican (cementación y compactación) dando lugar a una roca sedimentaria. Las rocas metamórficas (rocas que interesan en esta investigación), se originan a partir de rocas preexistentes que pueden ser rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas inclusive, que han sido alteradas por factores de metamorfismo como el calor, la presión los fluidos químicamente activos, produciéndose cambios químicos y/o estructurales en los minerales de las rocas originales; estos cambios producen un aumento de la densidad, crecimiento de cristales más grandes, reorientación de los granos minerales en texturas laminares o bandeadas denominadas foliación y la transformación de minerales de baja temperatura en minerales de alta temperatura (Tarbuck y Lutgens, 2001).

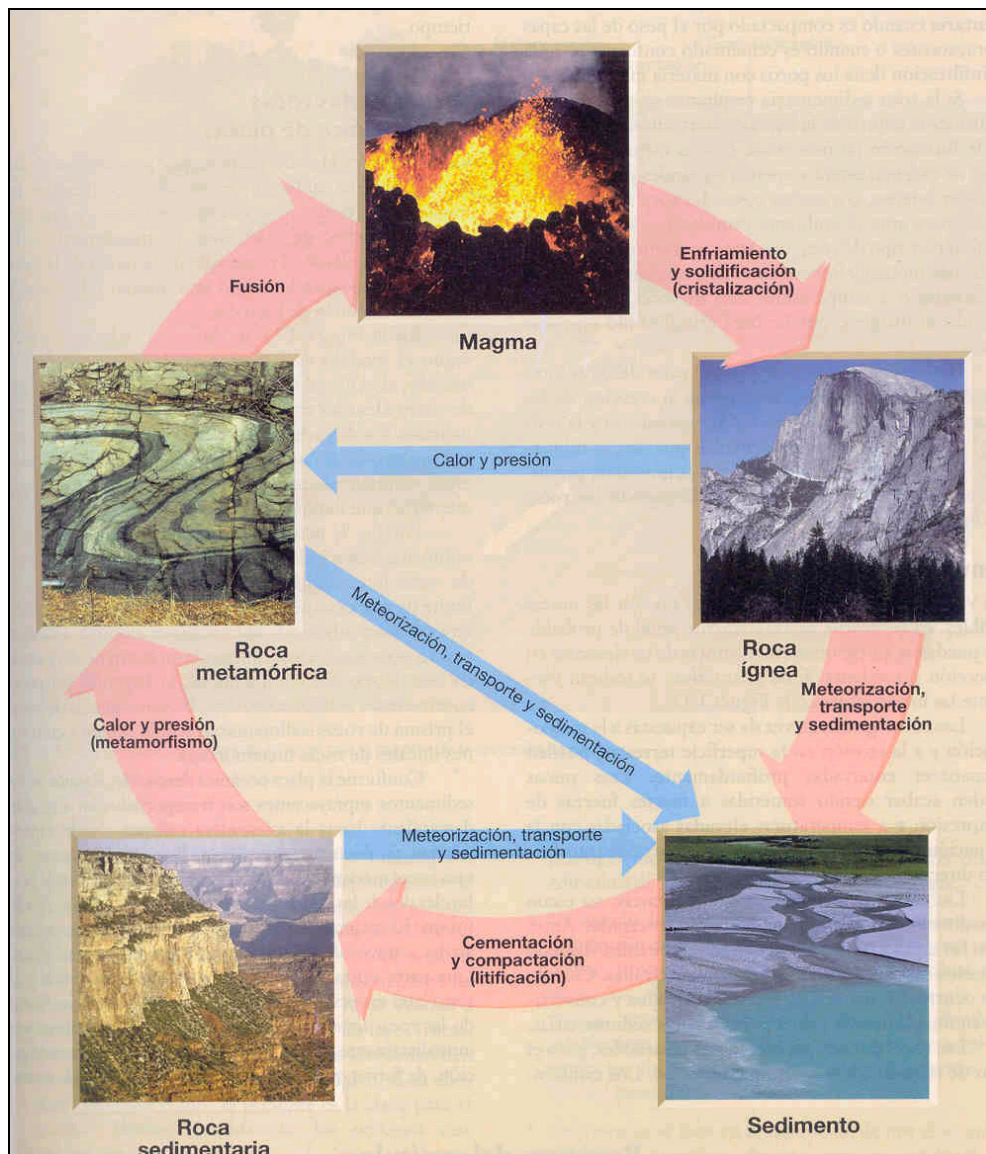


Figura 2.3. Ciclo de las rocas. (Tarbuck y Lutgens, 2001).

La foliación, puede manifestarse de tres formas, según Tarbuck y Lutgens (2001) citado por Jaramillo (2002):

- Pizarrosidad: Son capas paralelas, delgadas y planas en las rocas de grano fino. Los planos de foliación no son apreciables a simple vista y la roca se denomina pizarra.
- Esquistosidad: Son láminas delgadas formadas por la orientación de minerales de tamaño mayor que en la pizarrosidad y que le dan a la roca un aspecto escamoso, que toma el nombre de esquisto.
- Neisosidad: Es un bandeamiento de la roca originado por la segregación de minerales, en el cual cada banda tiene una composición mineralógica definida y diferente de la adyacente, donde la roca toma el nombre de neis.

Las rocas metamórficas compuestas por un solo mineral, formando cristales equidimensionales, generalmente no presentan foliación y por lo tanto tienen una apariencia masiva.

En la Tabla 2.1 se mencionan algunas de las rocas metamórficas más comunes, generadas por diversos procesos y en la Figura 2.4, una transición idealizada en la mineralogía de las lutitas, como consecuencia del metamorfismo.

Tabla 2.1. Rocas metamórficas comunes (Tarbuck y Lutgens, 2001).

Rocas metamórficas	Textura	Roca inicial	Comentarios
Pizarras	Foliada	Lutitas	De grano fino
Filitas	Foliada	Lutitas	De grano fino a medio
Esquistos	Foliada	Lutitas, rocas volcánicas y graníticas	Minerales diversos de grano grueso
Neises	Foliada	Lutitas, rocas volcánicas y graníticas	De grano grueso (no micáceo)
Mármoles	No foliada	Calizas, dolomías	Compuesto por granos de calcita intercrecidos
Cuarcitas	No foliada	Arenisca rica en cuarzo	Compuesto por granos de cuarzo intercrecidos
Corneanas	No foliada	Cualquier material de grano fino	De grano fino
Migmatitas	Débilmente foliada	Mezcla de rocas graníticas y máficas	Compuesto por capas con volutas
Milonitas	Débilmente foliada	Cualquier material	Roca dura de grano fino
Metaconglomerados	Débilmente foliada	Conglomerado rico en cuarzo	Cantos rodados muy estirados
Anfibolitas	Débilmente foliada	Rocas volcánicas máficas	De grano grueso

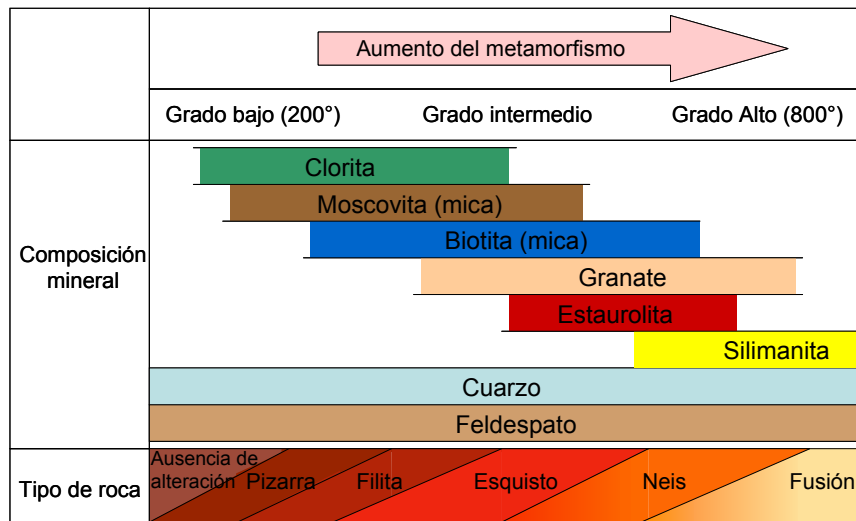


Figura 2.4. Transición típica en la mineralogía que se produce por metamorfismo progresivo de la lutita (Tarbuck y Lutgens, 2001).

Tarbuck y Lutgens (2001) afirma que con el estudio de las rocas metamórficas, se ha descubierto que ciertos minerales son buenos indicadores del ambiente metamórfico en el cual se formaron, por ejemplo la clorita se produce cuando las temperaturas son relativamente bajas (200°C), al contrario de la silimanita, la cual se forma en ambientes extremos (temperatura superior a los 600°C).

2.1.1.3 Topografía y drenaje

La topografía y el drenaje controlan la velocidad de la escorrentía y la humedad absorbida por la roca, como también, la velocidad de lixiviación subsuperficial de los compuestos solubles y la tasa de erosión y por ende la exposición de los minerales frescos (Townsend, 1985).

Las pendientes fuertes con altas velocidades de escorrentía son más propensas a la acción de la meteorización mecánica. De otro lado, las áreas planas o de baja pendiente, mal drenadas, en ambientes húmedos, propician ambientes alcalino-reductores. Las concreciones o nódulos ferrosos, son propias de topografías planas con gradientes menores de 8-9%. En general, las condiciones ideales para la meteorización química se consiguen en laderas ligeramente onduladas, donde la escorrentía superficial no es excesiva y el drenaje no está impedido. La formación de caolinitas se propicia en áreas de buen drenaje y las montmorillonitas son características de zonas mal drenadas (Gidigasú, 1976).

2.1.1.4 Vegetación

La influencia de la vegetación en la formación de suelos lateríticos ha sido estudiada por muchos investigadores. Algunos afirman que los bosques son necesarios para la formación de lateritas (Gidigasú, 1976), sin embargo, observaciones más detalladas muestran como estos suelos se encuentran desde

regiones boscosas, de alta precipitación, a zonas de sabanas abiertas, adyacentes a bosques. Otros autores (Humbert, 1965; citado por Gidigasú) sugieren que las lateritas se forman en climas que alternan estaciones húmedas y secas. Al parecer las condiciones de humedad de los bosques favorecen la formación de lateritas blandas, mientras los suelos endurecidos se encuentran en regiones de sabanas secas, donde se propician ambientes de oxidación y deshidratación (Gidigasú, 1976).

En general se puede proponer que las lateritas se forman en áreas cubiertas por vegetación, rodeada por bosques lluviosos, en llanuras con bosques aislados y en llanuras cálidas cubiertas de pastizales (Gidigasú, 1976).

Entre los organismos que mayor influencia tienen sobre el desarrollo del suelo son los vegetales, los cuales favorecen al desarrollo microorganismos que aportan y transforman la materia orgánica, algunos minerales y la estructura del suelo (Álvarez et al., 2004).

2.2 MINERALOGÍA, FÁBRICA Y MICROESTRUCTURA DE LOS SUELOS

2.2.1 Mineralogía

La mineralogía de los suelos residuales in situ varía considerablemente; parte de ella es heredada de las rocas o de los suelos de los que se derivan, y parte es debida a los procesos de meteorización durante su génesis (Fookes, 2004).

Los minerales son uno de los principales componentes del suelo, son sólidos naturales inorgánicos homogéneos, que presentan una estructura interna ordenada y una composición química definida (www.uned.es, 2004).

El mineral está compuesto por granos o cristales, que son un arreglo tridimensional de átomos y/o iones que se repite en intervalos regulares y se forman por solución, fusión o difusión en estado sólido; el menor arreglo tridimensional completo de un cristal se conoce como celda unitaria.

Los iones más frecuentes en el suelo son: OH^- , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , H_2PO_4^- , H_2BO_3^- , F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , SeO_4^{2-} y los cationes más frecuentes son: H^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Si^{4+} (Jaramillo, 2002).

La capacidad que posee un suelo de retener cationes se conoce como Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y depende directamente de la cantidad de cargas negativas presentes en su superficie (Cruz, 2003). A partir de la Capacidad de Intercambio Catiónico se puede obtener algún indicativo de la composición mineralógica de la fracción arcilla, tal como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Capacidad de intercambio catiónico típicas de los minerales de arcilla (Adaptada de Fookes, 2004 y Cruz, 2003)).

Mineral	CIC
Caolinita	3-15
Halloysita	5-50
Ilita	10-40
Clorita	10-40
Esmectita	60-150
Vermiculita	100-150
Montmorillonita	80-150
Materia orgánica	200-400

Además, los minerales presentan también variedad en cuanto a su gravedad específica, como se ve en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Gravedad específica de varios minerales (Fredlund y Rahadjo, 1993).

Mineral	Gravedad específica, Gs
Cuarzo	2.65
K-Feldespatos	2.54-2.57
Na-Ca-Feldespatos	2.62-2.76
Calcita	2.72
Dolomita	2.85
Moscovita	2.7-3.1
Biotita	2.8-3.2
Clorita	2.6-2.9
Pirofilita	2.84
Serpentina	2.2-2.7
Caolinita	2.61 ^a ; 2.64±0.02
Halloysita	2.55
Ilita	2.84 ^a ; 2.60-2.86
Montmorillonita	2.74 ^a ; 2.75-2.78
Attapulgita	2.3

^a Calculada a partir de la estructura cristalina

Los minerales originales de las rocas se conocen como minerales primarios, donde los menos resistentes desaparecen transformándose en otros minerales denominados minerales secundarios. Los principales grupos de minerales primarios corresponden a silicatos, aunque también se presentan óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfatos, sulfuros y fosfatos, entre otros. Los minerales secundarios, producidos por la alteración de los minerales primarios, corresponden a los filosilicatos y a los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, abundantes en suelos residuales de regiones tropicales.

En los suelos tropicales los minerales de arcilla más comunes son los aluminosilicatos hidratados, con estructura en capas o láminas, pertenecientes al grupo de los filosilicatos, constituidos por diversos patrones de apilamiento de capas de tetraedros de Si y octaedros de Al, Mg, Fe, entre otros (Figura 2.5).

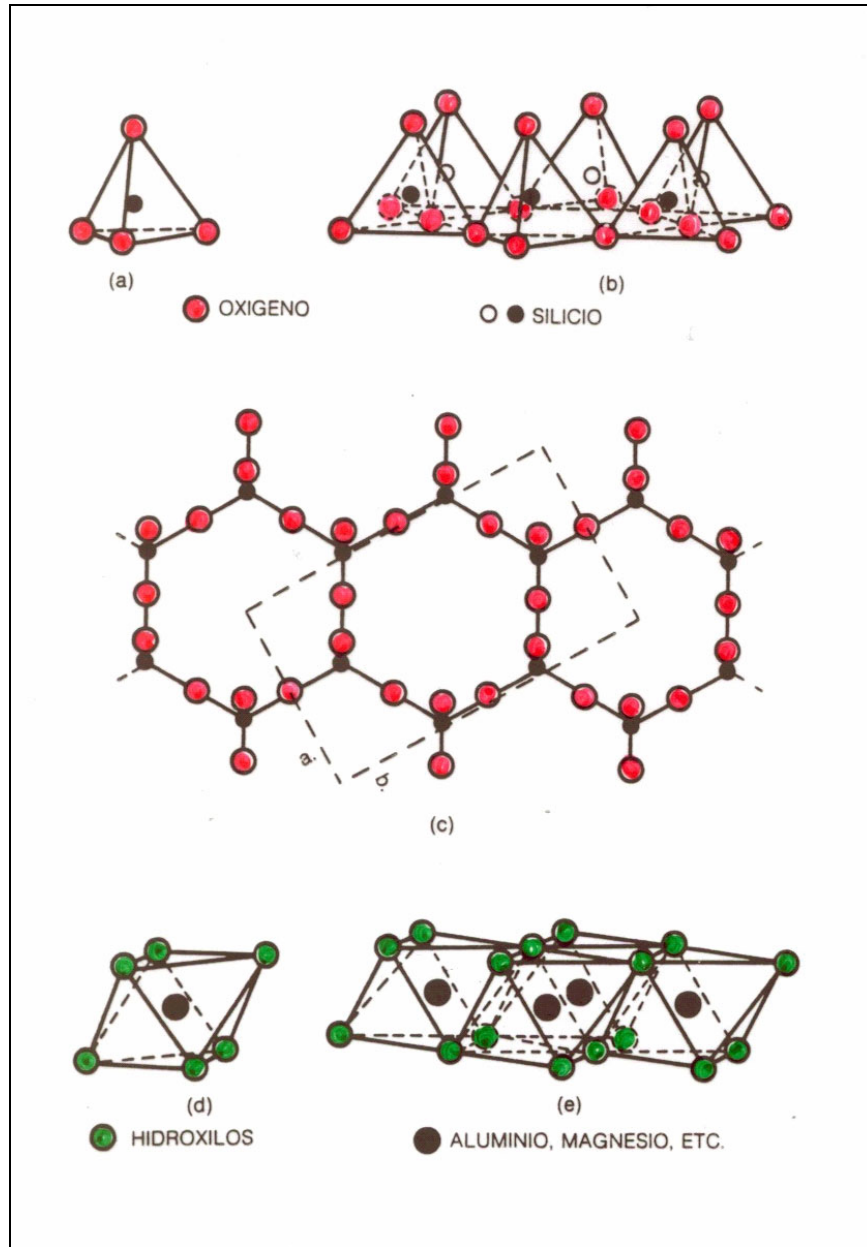


Figura 2.5. a) Estructura básica de los filosilicatos - tetraedros, b y c) Hexágonos de tetraedros, d y e) octaedros (García, 2004)).

Los minerales de menor a mayor grado de resistencia a la alteración según Jaramillo (2002), son:

olivino < augita < hornblenda < biotita < oligoclasa < albita
< ortoclasa < magnetita < cuarzo

El mineral más abundante, según Malagón (1995), en la composición de las arenas de los suelos del país, es el cuarzo; le siguen, en orden de abundancia, los feldespatos, los anfíboles y las micas. El cuarzo es el más resistente a la meteorización, debido a su estructura de tectosilicato y a que no presenta bases o elementos oxidables en su composición química, lo que implica que este mineral tiene mayores posibilidades de pasar al suelo y de permanecer más tiempo en él que los demás silicatos primarios.

En los suelos tropicales superficiales, son comunes la caolinita y un grado elevado de óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de hierro y principalmente de aluminio y como ya se mencionó como mineral primario y común, el cuarzo. En los suelos saprolíticos pueden predominar ilitas y la montmorillonita (Camapum, 2004).

Según Camapum (2004) los suelos se dividen en:

- Suelos granulares
- Suelos finos/arcillas
- Óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de hierro y aluminio: micro y macro agregados

Los suelos granulares presentan:

- Baja actividad
- Forma equidimensional de las partículas si se compara con la forma de las partículas de arcillas
- Poca influencia de la composición química y mineralógica en el comportamiento hidráulico y mecánico de los suelos
- Comportamiento que depende de la compactación y arreglo de los granos
- Predominan los silicatos (feldespatos, cuarzos y micas), óxidos (magnetita, hematina e ilmenita), carbonatos (dolomita y calcita) y sulfatos (anhídridos y yesos)

Los óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de hierro y aluminio presentan:

- Poca o nula plasticidad
- Elevada superficie específica
- No presentan expansión
- Poseen CIC despreciables en condiciones de pH alto
- Presentan exceso de carga positiva
- Los principales son la goethita, lepidocrocita, bohemita, gibbsita, hematita.

Las arcillas presentan:

- Alta actividad
- Partículas en forma de placa, tubo o fibra
- El comportamiento de las arcillas depende principalmente de la composición química y mineralógica, del grado de saturación, del índice de vacíos y la estructura del suelo.

Los principales minerales que componen las arcillas son la caolinita, illita, haloisita, montmorillonita y esmectita, entre otros.

2.2.2 Fábrica

Se conoce como fábrica al arreglo o distribución de las partículas, grupo de partículas y poros en el suelo. Se le ha dado el mismo significado a “microestructura” pero específicamente la microestructura es el efecto combinado de fábrica, composición y fuerza entre partículas (Mitchell, 1992).

La distribución del espacio poroso depende de la composición, de la textura (propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm), del contenido de materia orgánica y de la estructura (Jaramillo, 2002). Definiéndose, según Fookes (2004) dos tipos de espacios porosos:

- La microporosidad o porosidad textural, está compuesta por el volumen de los poros más finos, que se dan al interior de las partículas. El aumento de la microporosidad resulta de cambios en los minerales fácilmente meteorizables (feldespatos, biotita, olivino, piroxeno, etc.) y las pérdidas lentas por lixiviación.
- La macroporosidad o porosidad estructural, es el volumen de poros grandes del suelo “entre partículas”.

2.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS MINERALÓGICO

Según Mitchell (1992), los métodos y técnicas empleadas para determinar la composición mineralógica de los suelos incluyen (Figura 2.6):

- Análisis del tamaño de partícula y su separación.
- Tratamiento previo al análisis mineralógico.
- Análisis químico de óxidos libres, hidróxidos, amorfos constitutivos y material orgánico.
- Estudio en microscopio petrográfico de limos y granos de arena.
- Estudio en microscopio electrónico.
- Difracción de rayos– X para identificación de minerales cristalinos.
- Análisis térmico.
- Determinación de superficie específica.
- Análisis químico de capas de carga, capacidad de intercambio catiónico, pH y sales solubles.
- Ensayo de coloración para identificación de arcillas.

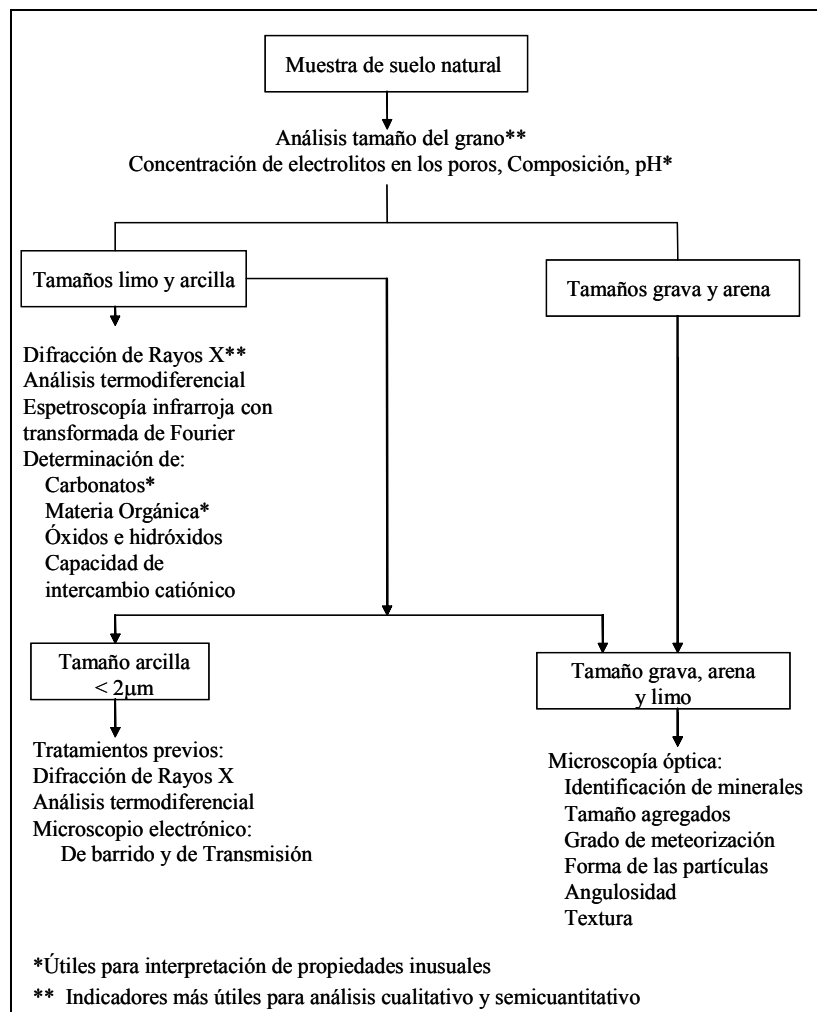


Figura 2.6. Análisis composicional de los suelos (Adaptada de Mitchell, 1992).

Mitchell (1992), afirma que los métodos más utilizados son la difracción de rayos-X, el análisis térmico y el microscopio electrónico, sin embargo ninguno es completamente satisfactorio debido a los pequeños tamaños de las partículas y a la variada mezcla de minerales en los suelos (representatividad de la muestra).

2.3.1 Difracción de rayos-X

Es el método más utilizado para la identificación de los minerales del suelo de grano fino, como las arcillas, que no pueden verse usando equipos ópticos, y para el estudio de la estructura cristalina; permiten determinar los espaciamentos entre los planos atómicos de los minerales y los ángulos a los cuales se dan las difracciones de los rayos-X, parámetros que son conocidos para muchos materiales cristalinos, lo que permite su identificación por comparación.

Los rayos-X inciden sobre el cristal y penetran a una profundidad de varios millones de capas atómicas que al ser difractados pueden estar en fase o fuera de fase, en el primer caso, las ondas se refuerzan y son registradas como picos. Las

que están fuera de fase, provocan interferencia y se anulan, allanando el perfil (Mendes, 2004).

El principio fundamental de la difracción de rayos-X se expresa mediante la Ley de Bragg que relaciona la longitud de onda (λ), la distancia interplanar (d) y el ángulo de difracción (θ) constitutivos de los rayos-X (Figura 2.7)

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \text{Ley de Bragg}$$

Con n = como orden de refracción.

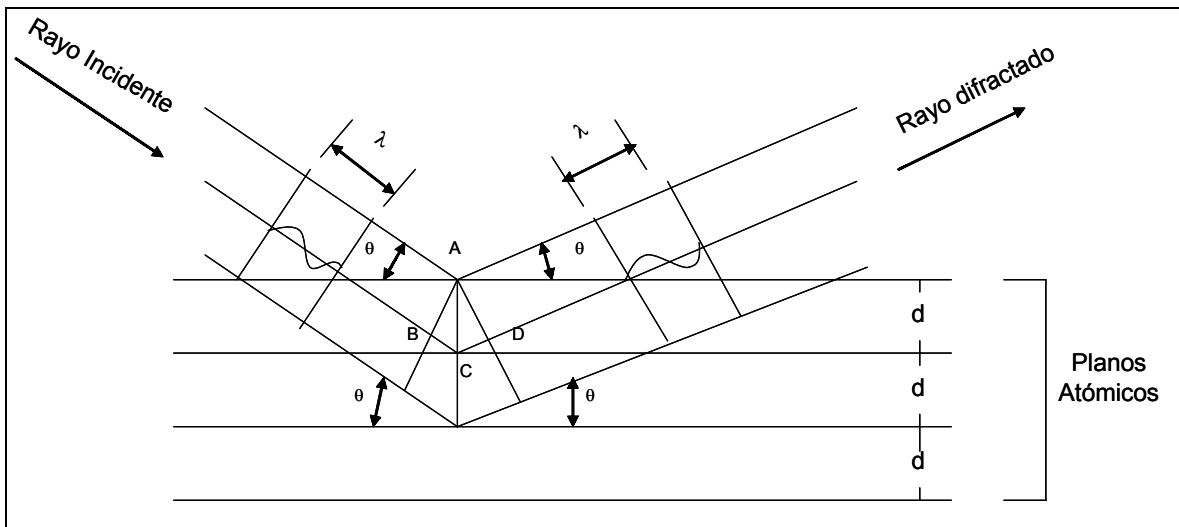


Figura 2.7. Condiciones geométricas para difracción de rayos-X de acuerdo con la Ley de Bragg (Mitchell, 1992).

Algunos minerales presentan reflexiones con valores semejantes entre si, pero responden de forma diferente si se les realiza tratamientos especiales como por secado o con glicolage.

2.3.2 Análisis térmico

Este método consiste en estudiar el comportamiento de una muestra, para el caso del suelo, al ser esta expuesta a una gradiente térmico (a una velocidad específica durante un intervalo determinado de temperatura), bajo una atmósfera definida, sea oxidante (O_2) o inerte (N, Ar), dentro de las más comunes. Bajo este método se encuentran dos variaciones principales, que se pueden convertir en tres, donde la primera consiste en medir los cambios de peso (TG) conforme la muestra es expuesta a dicha rampa y la segunda en monitorear los cambios o variaciones en la temperatura (DTA) o cambios calorimétricos (DSC), con relación a un patrón inerte, el cual casi siempre es alúmina (Al_2O_3), debido a reacciones de carácter endotérmico o exotérmico que se dan en la muestra conforme varía la temperatura en el ensayo, generando una curva similar a la presentada en la Figura 2.8.

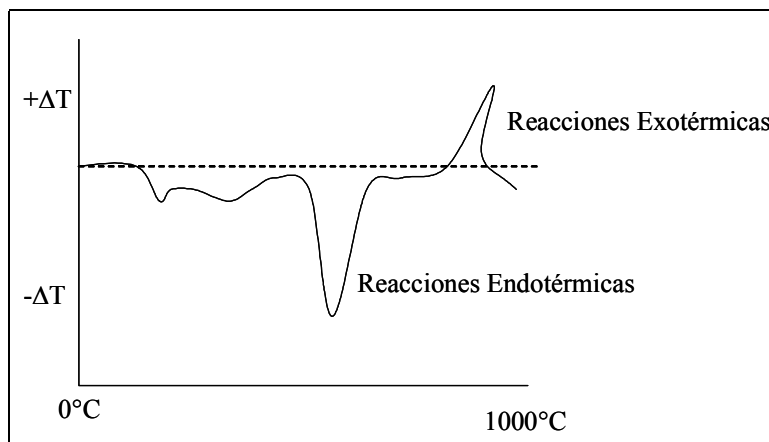


Figura 2.8. Termograma de una arena arcillosa (Mitchell, 1992).

Mitchell (1992), anota que las reacciones térmicas que generan "picos" en el termograma son:

- Disociación: Separación en forma de gases de compuestos contenidos en los minerales, como es el caso del CO_2 en la calcinación de carbonatos (CO_3^{2-})
- Deshidratación: la temperatura a la cual la mayor cantidad de agua de la estructura cristalina se pierde, es la propiedad más indicada para la identificación de minerales de arcilla.
- Cristalización: los nuevos cristales se forman por materiales amorfos y por viejos cristales descompuestos a bajas temperaturas. Usualmente es acompañada por una pérdida de energía.
- Cambio de fase: algunas estructuras cristalinas cambian de una forma a otra (poliformos), a una temperatura específica y la energía de transformación se muestra como un "pico" en el termograma.
- Oxidación: reacción de oxidación, donde se da la combustión de materia orgánica o la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} .

Para los minerales de arcilla, la reacción endotérmica se da entre 100°C y 200°C como pérdida de agua absorbida, la deshidratación entre 500°C y 1000°C y la recristalización exotérmica entre 800°C y 1000°C . Para minerales no arcillosos, los carbonatos dan un muy largo "pico" endotérmico entre 800°C y 1000°C y los óxidos presentan un "pico" endotérmico entre 250°C y 450°C (Mitchell, 1992).

2.3.3 Microscopio electrónico de barrido

La distancia focal (alrededor de 2nm) y su gran profundidad de campo, que permite una visualización tridimensional, hace especialmente valioso este instrumento para el estudio de la microestructura, composición química del suelo y confirmación de la presencia de minerales específicos a partir de sus morfologías características.

El microscopio electrónico de barrido contiene componentes similares a los del microscopio óptico, un sistema de iluminación, un juego de lentes y un sistema de

proyección de imágenes (Mesa y Solano, 2004). Un rayo de electrones se acelera a través de un campo electrónico, adquiriendo energía cinética, incidiendo sobre la muestra y provocando una dispersión de una serie de señales que generan la imagen.

2.3.4 Microscopía óptica

El examen de secciones delgadas en un microscopio polarizador facilita la identificación de partículas mayores de 10mm, es útil para el estudio del tamaño, forma, textura, identificación y condición del grano individual y el agregado en el rango de arenas y limos y sus relaciones con otros componentes en dos dimensiones. Las partículas de arcillas no se pueden distinguir.

2.3.5 Fluido de electrolito en los poros

La concentración total de sales solubles puede ser determinada por la conductividad eléctrica al extraer el fluido de los poros. Técnicas químicas y fotométricas se usan para determinar los elementos constitutivos de la extracción (Mitchell, 1992).

2.3.6 Determinación del pH

Es la relación entre el contenido de protones y iones de OH^- y determina el grado de acidez o alcalinidad de un suelo (Jaramillo, 2002). Es relativamente fácil de medir usando un medidor de pH o un indicador especial. El valor obtenido depende de la relación suelo – agua. El pH decrece con el aumento en la concentración de sales neutras en la solución y con el incremento en la cantidad de sales de CO_2 disuelto.

Según el pH medido en agua (Jaramillo, 2002), los suelos se agrupan en:

- Suelos ácidos: $\text{pH} < 6.5$. Los suelos ácidos predominan en Colombia.
- Suelos neutros: $6.5 < \text{pH} < 7.3$
- Suelos básicos: $\text{pH} > 7.3$

El pH puede ser determinado también en KCl y la diferencia entre este y el pH en H_2O ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), es utilizado como un parámetro de evaluación del perfil de meteorización (Camapum, 2004), donde:

$\Delta\text{pH} > 0$ Indica predominancia de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio en el suelo

$\Delta\text{pH} < 0$ Indica predominancia de minerales de arcilla en el suelo.

2.4 METEORIZACIÓN

Los procesos de meteorización comprenden alteraciones de la roca por medio de cambios texturales, químicos y mineralógicos que son inducidos a su vez por modificaciones del ambiente físico, fisicoquímico y químico. Cuando los minerales primarios de las rocas quedan expuestos o cerca a la superficie, el nuevo ambiente físico y químico difiere notablemente del ambiente en que ellos se formaron y se inicia el proceso de adaptación a las nuevas condiciones (Restrepo y Toussaint, 1984).

Bajo la meteorización física o mecánica los fragmentos resultantes conservan la composición química y mineralógica del material parental. La acción del agua, el oxígeno y el dióxido de carbono dentro de los más importantes (Jaramillo, 2002), sobre los minerales (meteorización química) promueve la formación de minerales secundarios más estables a las nuevas condiciones del entorno. El agua que penetra a través de poros y microfisuras disuelve los elementos más solubles, generando inestabilidad que a la vez, es suplida en muchas ocasiones por los grupos oxígeno e hidroxilo. La cristalización de los nuevos productos convierte la superficie de la roca en pequeños fragmentos, más parecidos a suelo que a roca, con propiedades químicas, físicas y de mineralogía diferentes a los de la roca original (Gidigasú, 1976).

Algunas rocas son muy resistentes y permanecen estables mientras otras sufren grandes alteraciones hasta profundidades considerables. Aunque los mecanismos de meteorización, física y química, pueden predominar en un momento dado, en general actúan combinadamente. La meteorización mecánica provee una mayor superficie para la acción química y esta a su vez afecta la intensidad de la fragmentación. Estudios adelantados por Peltier (1950) indican que el predominio de la meteorización física o química está íntimamente ligado a las condiciones climáticas (precipitación y temperatura).

2.4.1 Meteorización física

La meteorización física o mecánica de las rocas es la fragmentación de la roca original en granos más pequeños que abarcan desde bloques angulares, gravas hasta arena, limo y arcilla. Existen varios factores que ayudan en el proceso como los cambios periódicos de temperatura, la erosión, los cambios de humedad, congelamiento de agua en las fisuras de las rocas y la acción de organismos vivos (plantas y animales), (Camapum, 2004).

Los cambios de temperatura pronunciados (días calientes y noches frías) o los debidos a las estaciones, generan continuos cambios en los esfuerzos en la roca (compresión y tensión) que la hacen fallar por fatiga, presentándose descascaramiento o exfoliación en su superficie. La desintegración también se da por efecto del desconfinamiento en excavaciones o por la exposición directa de la superficie de la roca en excavaciones, cortes de carreteras, explotación de canteras o pérdida de cobertura por erosión. Así mismo, el transporte de material

en corrientes de agua o por acción del viento, puede producir fracturamiento de la roca. La acción de las raíces de las plantas abriendo las fisuras de la roca, o los animales excavando madrigueras y la intervención antrópica (deforestación, construcción de túneles, canteras, etc), favorecen la fragmentación de las rocas. Finalmente, el fracturamiento debido a fallas geológicas es un factor importante en la desintegración física de la roca y en el subsiguiente proceso de meteorización química por generación de superficies activas de meteorización (Fookes, 2004).

Los productos de la meteorización física conservan las características de composición química y mineralógica de la roca de la que provienen y la generación de fragmentos cada vez más pequeños, provee una gran superficie para el ataque de los agentes químicos (Jaramillo, 2002).

2.4.2 Meteorización química

La descomposición de la roca y la formación de nuevos minerales se denominan meteorización química. Los agentes de la meteorización superficial, que desencadenan las reacciones químicas sobre los minerales de la roca, son el agua, el oxígeno, el dióxido de carbono y los ácidos orgánicos, derivados de la descomposición de la vegetación, dentro de los más importantes. En la alteración química juegan un papel predominante la estructura cristalina de los minerales, el arreglo entre los granos y las microfracturas, que permiten la entrada de los reactivos, que ayudan en el deterioro de la materia sólida mineral (Fookes, 2004).

La resistencia de la roca a la acción química depende de su composición, pero otros factores, como el fracturamiento y la porosidad, que facilitan la entrada de agua y ácidos, y el clima son igualmente importantes. Los distintos procesos químicos que se pueden desarrollar comprenden: solución, intercambio de hidratación, hidrólisis, carbonatación, oxidación y reducción; los cuales pueden operar simultáneamente (Jaramillo, 2002).

La lluvia es el principal agente de la meteorización química y a la par es el regulador de la vegetación. Su acción es ejercida directamente en la descomposición, lixiviación y desarrollo del suelo e indirectamente a través de la influencia sobre la naturaleza de la vegetación (Camapum, 2004).

2.5 CLASIFICACIÓN DE UN PERFIL DE METEORIZACIÓN

El proceso de meteorización genera perfiles compuestos por materiales muy heterogéneos que van desde completamente meteorizados hasta la roca sana (Arango, 2000). Existen varios sistemas para clasificar un perfil de meteorización, uno ellos, según Fookes (2004), es la clasificación por la Norma BS 5930 (1981), que divide un perfil de meteorización en seis categorías como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Perfil de meteorización del macizo rocoso (Fookes, 2004. Tomada de la Tabla 8 de Norma BS 5930, 1981).

Término	Descripción	Grado
Roca Fresca	Sin rasgos visibles de meteorización del material rocoso; puede haber una ligera decoloración en las superficies mayores de discontinuidad	I
Ligeramente meteorizada	La decoloración indica la meteorización del material rocoso y las superficies de discontinuidad. Todo el material rocoso puede estar decolorado por meteorización	II
Moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material rocoso está descompuesto o desintegrado como suelo. La roca fresca o decolorada está presente como un entramado o como bloques aislados	III
Muy meteorizada	Más de la mitad del material rocoso está descompuesto o desintegrado como suelo. La roca fresca o decolorada está presente como un entramado o como bloques aislados	IV
Completamente meteorizada	Todo el material rocoso está descompuesto o desintegrado. La estructura de la masa original se encuentra intacta	V
Suelo residual	Todo el material rocoso está convertido en suelo. La estructura de la masa y del material han desaparecido, hay cambio de volumen, pero el suelo no ha sido transportado significativamente	VI

En la práctica es común utilizar la clasificación propuesta por Brand para la Oficina de Control Geotécnico del departamento de servicios de ingeniería civil de Hong Kong, ya que esta es aplicable a todo tipo de suelos tropicales. La Tabla 2.5, muestra dicha clasificación.

Tabla 2.5. Clasificación según Brand (Arango, 2000. Tomado de Geotechnical Control Office, 1988).

Descripción de la zona	Símbolo	Características de la zona
Suelo residual	RS	Es un suelo residual derivado de la meteorización in situ, la estructura de la masa, la textura y la fábrica del material están completamente destruidas, es 100% suelo.
Roca parcialmente meteorizada 0/30% roca	PW 0/30	Tiene menos de un 30% de roca, el suelo preserva la estructura y fábrica del material parental. El contenido de roca no afecta el desempeño al esfuerzo cortante de la masa, pero las discontinuidades heredadas si pueden llegar a influenciarlo (saprolito).
Roca parcialmente meteorizada 30/50% roca	PW 30/50	Posee de un 30% a 50% de contenido de roca. El contenido de roca y las discontinuidades heredadas afectan su resistencia al esfuerzo cortante.
Roca parcialmente meteorizada 50/90% roca	PW 50/90	50% a 90% de contenido de roca. Posee una estructura entrelazada de discontinuidades.
Roca parcialmente meteorizada 90/100% roca	PW 90/100	Posee un volumen de roca mayor a 90%, se presenta una pequeña cantidad de material convertido a suelo a lo largo de las discontinuidades.
Roca fresca	UW	100% roca. Puede presentarse una pequeña decoloración a lo largo de las discontinuidades.

Otro método para clasificación de suelos es el método MCT (Miniatura Compactada Tropical) rápida, el cual agrupa a los suelos tropicales en dos grandes clases en cuanto a comportamiento suelos lateríticos (suelo residual impregnado, cementado o reemplazado por óxidos hidratados de hierro y aluminio (Fookes, 2004)) y no lateríticos, representados por las letras L y N respectivamente. Estas grandes clases se subdividen de acuerdo con su comportamiento, designado por sus características granulométricas (Nogami y Villibor, 1995). Los grupos de clasificación MCT son:

- LG´: Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas
- LA´: Arenas arcillosas lateríticas
- LA: Arena 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.

2.6 COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO

La amplia variación de los ambientes de meteorización y de los perfiles resultantes presupone que la variación de las propiedades índice y las características de resistencia y compresibilidad de los suelos residuales también lo sean.

Son abundantes las investigaciones sobre la gran influencia que tienen las condiciones ambientales, en las que se formaron los suelos, sobre sus propiedades como material de ingeniería. Panadian et al (1983) encuentran como variaciones en el secado (al aire y en horno), generan cambios en la relación de vacíos, las características de plasticidad y compresibilidad de los suelos residuales.

En los suelos naturales la distribución de poros depende de la génesis y las alteraciones sufridas a lo largo del tiempo, lo cual tiene un efecto en la curva de succión de los suelos. Las uniones generadas en los suelos tropicales por la meteorización propician el surgimiento de una estructura bimodal, en la cual las agregaciones contienen microporos y entre ellas los macroporos. En suelos sedimentarios de regiones templadas tiende a ocurrir una distribución de poros homogénea (Camapum, 2004).

En nuestro medio, investigaciones desarrolladas como tesis de pre y posgrado, trataron distintos aspectos acerca de las características de las rocas parentales, química del suelo, estabilidad geotécnica, microestructura, entre otros. Parra y Blandón (1983) describen las características microscópicas del comportamiento de rocas ígneas (batolito antioqueño) en estados de alta y baja deformación. Castaño (2002) presenta interrelaciones de la componente microestructural de un suelo residual del batolito antioqueño respecto a los parámetros de resistencia y compresibilidad al variar la aplicación del esfuerzo principal mayor y Mesa y Solano (2004) correlacionan la mineralogía y estructura del Stock de San Diego con su comportamiento mecánico (resistencia y compresibilidad).

3. GENERALIDADES

La zona de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Medellín, capital del departamento de Antioquia, al noroccidente colombiano y en el sector norte de la cordillera central, a una altura promedio de 1500 m.s.n.m., una temperatura promedio de 24°C y 1800 mm de lluvia promedio anual (Corrales y Leoz, 1996). Medellín se encuentra más precisamente localizado en el Valle de Aburrá, en un angosto valle disectado por el río que lleva su nombre y que fluye en dirección sur-norte.

Geológicamente, en el valle de Aburrá y sus alrededores predominan rocas metamórficas e ígneas (Restrepo y Toussaint, 1984). Las metamórficas objeto de este estudio, datan desde el cretácico hasta al precámbrico.

Los perfiles estudiados fueron originados de la meteorización de las rocas metamórficas correspondientes al neis de la Iguaná y a las anfibolitas de Medellín.

El neis de la Iguaná se localiza en la parte baja de la cuenca de la Quebrada la Iguaná y se extiende desde las inmediaciones del barrio Olaya Herrera hasta el cerro El Volador, presentando relaciones de contacto con la anfibolita (brechas intrusivas) y diques de diorita y cuarzdiorita con el Stock de Altavista. Los componentes principales del neis de la Iguaná son: plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo, acompañados de epidota, hornblenda y biotita; como minerales accesorios se encuentra la esfena, apatito, circón y pirita (Corrales y Leoz, 1996) y presenta un bandeamiento composicional debido a la concentración de minerales con clara orientación (Secretaría de planeación, 1998). La meteorización que actúa sobre este cuerpo metamórfico desarrolla suelos residuales limosos y arcillosos de colores claros y un saprolito moteado entre blanco y gris, los espesores de estos suelos residuales en general superan los 20 m (Rendón, 1999). El perfil en estudio se ubica en la coordenada 6° 16' 23'' de latitud Norte y 75° 35' 33'' de longitud W (Medellín) y una altura de 1470 m.s.n.m, en la empresa Indural S.A. Figura 3.1.

El otro perfil en estudio se localiza en el cerro El Volador, geológicamente según Restrepo y Toussaint (1984) pertenece a las anfibolitas de Medellín. Las anfibolitas de Medellín, se separan en dos unidades limitadas por el río Medellín, margen izquierda y margen derecha (Rendón, 1999). El cerro el Volador se localiza sobre las anfibolitas de la margen izquierda, estas constituidas esencialmente por hornblenda y plagioclasa, con una textura néisica a esquistosa (Corrales y Leoz, 1996); por lo general estas rocas se observan fuertemente meteorizadas, desarrollando suelos residuales de espesor considerable, en

general superior a los 20 m. Los metros más superficiales están constituidos por un limo arcilloso blando, de color pardo rojizo a amarillo, pasando a un saprolito limo arenoso, de color gris verdoso, con bandas blancas que presentan estructuras heredadas de la roca parental. El perfil de estudio originado de esta roca se ubica en la coordenada $6^{\circ} 16' 21''$ de latitud Norte y $75^{\circ} 35' 06''$ de longitud W (Medellín) y una altura máxima de 1630 m.s.n.m, Figura 3.1.

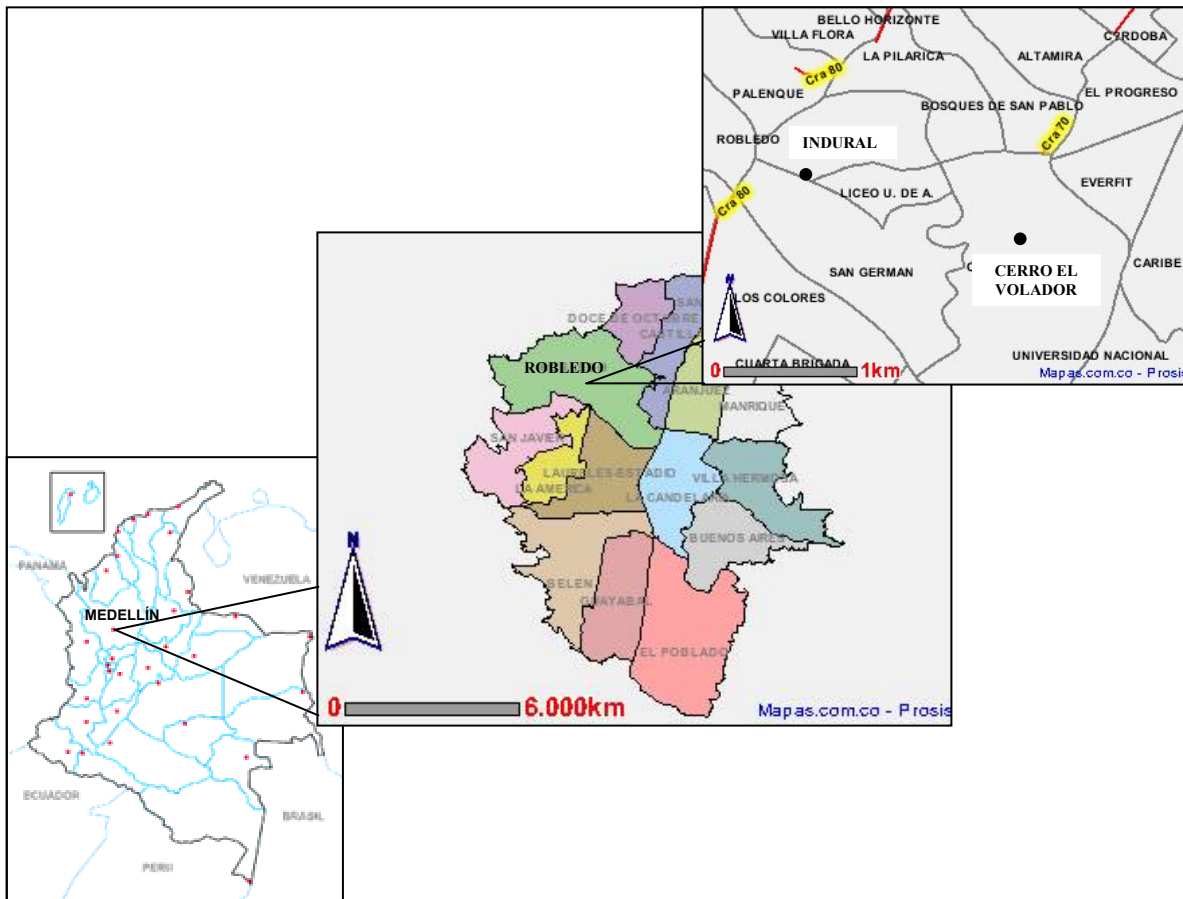


Figura 3.1. Mapa localización perfiles de estudio.

4. METODOLOGÍA

Como se mencionó en el capítulo 3, fueron analizados dos perfiles originados de rocas metamórficas. El perfil ubicado en la Empresa Indural S.A. es originado del neis de la Iguaná (Foto 4.1) y el perfil ubicado en el cerro El Volador proveniente de las anfibolitas de Medellín (Foto 4.2). En cada uno de los perfiles se tomaron muestras de la roca parental y de tres niveles diferentes del perfil de meteorización. El criterio de selección de cada uno de los niveles se realizó observando que se tuvieran cambios de textura, color y comportamiento plástico (por prueba manual) entre ellos; adicionalmente, se tuvo en cuenta posición en altura (vertical) de cada nivel, con el nivel 1 correspondiente al nivel más superficial, después viene el nivel 2 y suprayacente a la roca, se localiza el nivel 3. Este capítulo presenta la metodología utilizada en la investigación para la toma de muestras y realización de los ensayos.

Además de los dos perfiles de meteorización estudiados, en cada zona se seleccionaron otros dos perfiles adicionales, alejados de 2 a 3 kilómetros de los perfiles principales, para los cuales fueron ejecutados ensayos de caracterización físico-química. La finalidad de estos ensayos fue determinar que tan característico es el perfil principal seleccionado de la zona de estudio.

4.1 TOMA DE MUESTRAS

En cada perfil se tomó una muestra de la roca expuesta en su parte baja y para los tres niveles de meteorización se tomaron dieciocho muestras de cajón, tres por cada nivel (cajones de 25 cm*25 cm*25 cm) y dieciocho muestras en tubo shelby, también tres por cada nivel (shelby de 2" de diámetro), adicionalmente se tomaron muestras alteradas (en bolsa plástica).



Foto 4.1. Perfil neis de la Iguaná (Empresa Indural).

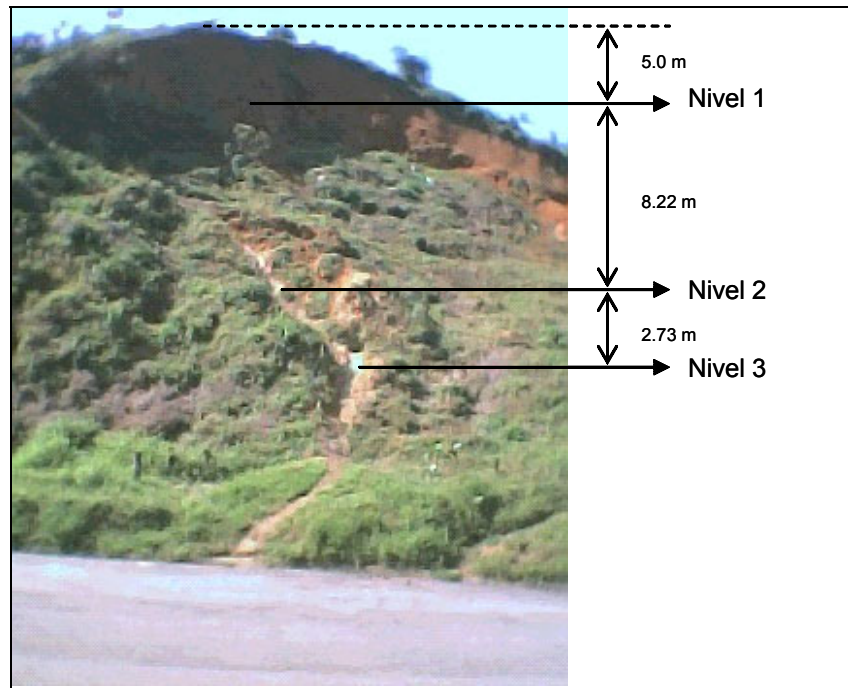


Foto 4.2. Perfil anfibolitas de Medellín (cerro El Volador).

4.2 ENSAYOS

Primero fueron realizados ensayos de clasificación física de los suelos de cada uno de los niveles. Estos ensayos consistieron básicamente en determinaciones de humedad natural, gravedad específica, límites de Atterberg, determinación de la porosidad, análisis granulométricos por el método mecánico, sedimentación y utilizando el granulómetro láser. Para clasificar los suelos se emplearon varios métodos, la clasificación según la Norma BS 5930, según Brand, la clasificación Unificada y la clasificación MCT rápida, luego se realizaron ensayos de clasificación química y mineralógica. Los ensayos de clasificación mineralógica consistieron en análisis con difracción de rayos-X, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Por último, se efectuaron ensayos de caracterización mecánica.

4.2.1 Caracterización física

4.2.1.1 Determinación de la humedad natural

La humedad natural de los suelos se determinó tan pronto fueron tomadas las muestras y llevadas al laboratorio. Es bien sabido, que el valor de humedad natural puede variar de acuerdo con la época de toma de muestras (Camapum, 2004), en este caso las muestras fueron tomadas en época de invierno. El ensayo fue ejecutado según la Norma ASTM D2216-92.

4.2.1.2 Determinación de la gravedad específica

La determinación de la gravedad específica Norma ASTM D854-92, permitirá determinar la fracción arcilla, la relación de vacíos y la porosidad, entre otros; adicionalmente, estos valores podrán ser correlacionados con la gravedad específica de los minerales presentes en los suelos estudiados.

4.2.1.3 Determinación de los Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg NORMA ASTM D4218, consistieron en determinar el límite líquido (w_L), el límite plástico (w_P), y el índice de plasticidad, valores que servirán para la caracterización física de los suelos.

4.2.1.4 Análisis granulométrico

Para clasificar los suelos de cada uno de los niveles según su tamaño en gravas, arenas, limos y arcillas; se empleó el ensayo de granulometría mecánica mediante el uso de tamices, procedimiento realizado siguiendo la Norma ASTM D422. Para la determinación de la fracción fina se ejecutaron dos tipos de ensayo: el método de sedimentación con defloculante (silicato de potasio), midiendo la velocidad de sedimentación a partir de la Ley de Stokes, utilizando hidrómetro y siguiendo la Norma ASTM D422-63; y el granulómetro láser del laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Brasilia (UnB), para determinación de la fracción fina (Foto 4.3).

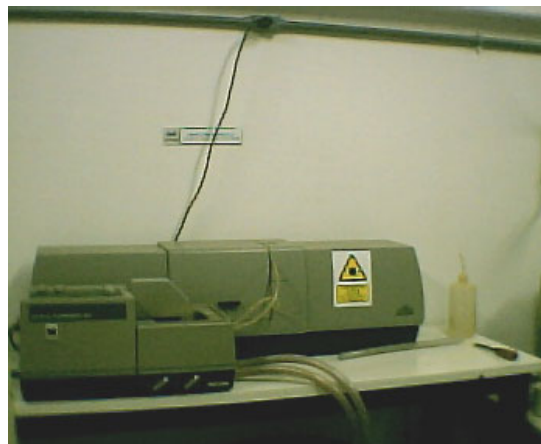


Foto 4.3. Granulómetro Láser del laboratorio de Geotecnia UnB.

Para la ejecución del ensayo con el granulómetro se utilizó la muestra secada al aire, que pase el tamiz N° 100 (0.149 mm); aproximadamente a 1.0 g de este suelo es sometido a ensayos con y sin ultrasonido y otra parte se coloca por 24 h en solución de hexafluorato de sodio y se hizo el ensayo igualmente con y sin ultrasonido. La utilización del ultrasonido se asemeja a la desagregación mecánica y con defloculante a la desagregación química. Este equipo tiene como ventaja la rapidez en la ejecución y precisión, así como la reproducibilidad y confiabilidad del ensayo.

4.2.1.5 Determinación de la porosidad

Para la determinación de la porosidad y la distribución del tamaño de los poros de los suelos de cada uno de los niveles, se empleó el Poresizer 9320 del Laboratorio de Yacimientos y Fluidos de perforación de la Universidad Nacional de Colombia (Foto 4.4), este equipo cuenta con dos puertos para medir a bajas presiones y altas presiones (determinación de macroporos y microporos, respectivamente). El Poresizer, determina la porosidad y distribución de los poros basado en la Ley de capilaridad, que gobierna la penetración de líquidos en poros pequeños. Esta ley, en el caso de líquidos no humectantes como el mercurio y poros no cilíndricos, se expresa por la ecuación de Washburn, de la siguiente forma:

$$D = -\left(\frac{l}{P}\right)^* 4\gamma \cos \phi$$

donde D= Diámetro del poro

P= Presión aplicada

γ =Tensión superficial (se recomienda 485 dinas/cm)

ϕ = Ángulo de contacto sólido-mercurio (se asume 130°)

El volumen del mercurio (V) que penetra en los poros es medido directamente como función de la presión aplicada (P). Esta información P-V sirve para caracterizar la estructura del poro. La distribución del volumen de poros en los materiales se obtiene mediante la intrusión o expulsión de mercurio. Cuando el radio de curvatura del mercurio en contacto con el sólido es igual al de la entrada de un poro, el mercurio llena el volumen dentro del poro (Manual Poresizer 9320, 2002)



Foto 4.4. Poresizer del Laboratorio de yacimientos y fluidos de perforación-UN.

4.2.2 Clasificación de los suelos

Para la clasificación de los suelos que componen los dos perfiles en estudio se emplearon cuatro metodologías descritas en Capítulo 2. La clasificación según la Norma BS 5930, (Tabla 2.4) y la propuesta por Brand (Tabla 2.5), que permiten la

identificación del perfil de meteorización como un todo, la clasificación Unificada ampliamente conocida y la MCT rápida donde se clasifica cada nivel de meteorización de forma que permita inferir comportamientos geotécnicos de los suelos, por tener esta última poca difusión local, se describe a continuación su metodología.

La clasificación MCT rápida fue presentada por Nogami y Villibor (1995), para clasificar el suelo según esta propuesta, se debe tomar suelo que pase el tamiz N° 40 (0.42 mm) y adicionarle agua hasta formar una pasta que se deje penetrar 1mm por la caída libre de un penetrómetro de punta plana, de 1.3 mm de diámetro y 10 gramos de peso. Luego con esta pasta se llenan como mínimo tres anillos de PVC de de aproximadamente 20 mm de diámetro interno y 5 mm de altura. Adicionalmente, son moldeadas bolas de suelo de alrededor de 10 gramos de peso para la determinación del contenido de humedad. Las pastillas y bolas de suelo deben ser secadas al aire por lo menos 6 horas (Foto 4.5).



Foto 4.5. Secado al aire de pastillas y bolas de suelo método MCT.

Luego de secar al aire las pastillas se mide el diámetro de ellas y se determina su contracción (ct) como la diferencia entre el diámetro inicial y el diámetro final. Enseguida se colocan las pastillas sobre un papel filtro, que se encuentra sobre una piedra porosa, que a su vez está en contacto con agua. Las pastillas absorben agua por capilaridad y después de 2 horas se mide cuantos milímetros en profundidad entra el penetrómetro en la pastilla (Foto 4.6); adicionalmente, con el valor de la contracción (ct) se determina la constante c' como:

Si la contracción (ct) está entre 0.1 y 0.5 mm $\rightarrow c'=(\log_{10} ct +1)/0.904$
Si la contracción (ct) es > 0.6 mm $\rightarrow c'=(\log_{10} ct +0.7)/0.5$ (Nogami y Villibor, 1995)



Foto 4.6. Penetración de las pastillas con el penetrómetro.

Con estos dos valores (c_t) y c' , se clasifican los suelos de acuerdo con el método MCT rápido por medio de la Tabla 4.1, donde:

- LG': arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas
- LA': Arenas arcillosas lateríticas
- LA: Arena 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

Tabla 4.1. Clasificación MCT rápida (Modificada de Nogami y Villibor, 1995).

DETERMINACIÓN DEL GRUPO MCT		
c'	Penetración (mm)	Grupo MCT
< 0.5	< 3.0	LA
	3.1 a 3.9	NA
	≥ 4.0	NA/NS'
0.6 a 0.9	< 2.0	LA-LA'
	2.1 a 3.9	NA'-NA
	≥ 4.0	NS'-NA'
1.0 a 1.3	< 2.0	LA'
	2.1 a 3.9	NA'
	≥ 4.0	NS'
1.4 a 1.7	< 2.0	LA'-LG'
	2.1 a 3.9	NA' / NG' - NS'
	≥ 4.0	NS'-NG'
≥ 1.8	< 2.0	LG'
	2.1 a 3.9	NA'
	≥ 4.0	NG'
- Significa equivalente		
/ Significa que tiene mayor peso la primera clasificación		

Esta clasificación puede ser comparada según Nogami y Villibor (1995), con la Clasificación Unificada, como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Clasificación MCT y diversos grupos de suelos integrados (Modificado de Nogami y Villibor, 1995).

Granulometría Típica		Arcillas Limos	Arenas limosas	Limos Limos arenosos	Arcillas Arcillas arenosas Arcillas limosas Limos arcillosos	Arenas limosas	Arenas arcillosas	Arcillas Arcillas arenosas Arcillas limosas 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	USC	SP SM	MS SC ML	SM,CL ML,MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
	AASTHO	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7-5	A-6 A-7-5	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

4.2.3 Caracterización química

La caracterización química fue realizada con la finalidad de definir el efecto de la meteorización en la composición química del perfil y consiste en la determinación del pH en agua y en solución de cloruro de potasio (KCl) y la determinación de la cantidad de calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), fósforo (P), aluminio (Al), acidez (H+Al), materia orgánica y saturación de bases y aluminio, así como la Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C) de los suelos. Los ensayos fueron ejecutados por la empresa SOLOQUÍMICA de la ciudad de Brasilia en Brasil, la cual trabaja este análisis bajo las Normas de EMBRAPA (1997).

4.2.4 Caracterización mineralógica

El conocimiento de la composición mineralógica de los suelos es fundamental para la comprensión de las características y comportamiento físico. Para esta caracterización, se ejecutaron análisis de difracción de rayos-X, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

4.2.4.1 Difracción de rayos-X

Este ensayo, fue realizado en el difractómetro RIKAGU, modelo "Geiger Fix" D-Max-B, perteneciente al laboratorio de Difractometría de rayos-X del Instituto de Geociencias de la Universidad de Brasilia (UnB), cada 2θ en modo continuo y con una velocidad de 2°/min (Foto 4.7). Los difractogramas fueron interpretados por medio del software JADE 3.0.

El ensayo fue realizado tanto para las muestras de suelo como para las de roca. Las muestras de suelo fueron inicialmente secadas al aire, luego tanto los

especímenes de roca como suelo fueron pulverizados, moliéndolos en un mortero de ágata, hasta que toda la muestra pasara la malla N° 200 (0.074 mm), en el caso de los suelos, fueron molidos con acetona para prevenir una posible alteración de los minerales presentes.

El análisis se realizó a la fracción total de muestra que pasó el tamiz N° 200, así como también fue analizada la fracción arcilla, la cual fue separada por suspensión acuosa con la ayuda de una centrifuga. En algunos casos, fue necesaria la utilización de un defloculante (pirofosfato de sodio), debido a que no se obtuvo muestra de arcilla suficiente para preparar las láminas. Se prepararon tres láminas de la fracción arcilla, de las cuales una fue analizada en el difractómetro, otra fue sometida a tratamiento con etileno glicol y la restante secada a 490°C. Dichos tratamientos fueron hechos para determinar la presencia de minerales arcillosos importantes de difícil identificación. Algunos minerales (por ejemplo. Caolinita, vermiculita y esmectita) presentan un difractograma diferente (“sin picos”) cuando son secados a 490°C, así mismo, el difractograma cuando se tienen minerales expansivos varía al realizar tratamiento con etileno glicol.



Foto 4.7. Difractómetro RIKAGU del laboratorio de Difractometría de rayos-X, UnB.

4.2.4.2 Microscopía óptica

Para la realización de la microscopía óptica fue necesario preparar láminas delgadas de las muestras inalteradas y de las muestras falladas por compresión simple tomando especialmente la zona de falla, con el fin de ser observadas en el microscopio óptico y en el microscopio electrónico de barrido. Para obtener las secciones delgadas de las muestras de suelo, primero se secaron los suelos al aire para luego impregnarlos por goteo al vacío, que consiste en la evacuación de aire y otros gases de los poros y fisuras del suelo, reemplazándolos por resina. Una vez endurecido el conjunto (aproximadamente 15 días), se cortan trozos para elaborar las secciones delgadas las cuales tienen un espesor del orden de 30µm y se pulen con pasta de diamante para su análisis en el microscopio. Las secciones se hicieron en el laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional (UN). Se prestó atención especial a identificar en las zonas de falla los minerales presentes, a

través de que minerales se produce la rotura y las características de la falla (rugosidad y abertura).

4.2.4.3 Microscopía electrónica de barrido “Scanning Electron Microscopy” (SEM)

La microscopía electrónica de barrido fue realizada sobre trozos de material inalterado, según el método empleado por la Empresa FURNAS TECNOLOGÍA de Brasil y a las secciones delgadas observadas en el microscopio óptico, incluyendo la roca. Estas secciones se analizaron en el microscopio de barrido (SEM) de la Universidad Nacional de Colombia (UN) **JSM-5910 LV**, el cual posee una sonda de microanálisis de energías dispersas de rayos-X (EDX), que permite la identificación cualitativa y cuantitativa de los elementos químicos en los minerales, para lo cual las secciones delgadas pulidas deben primero ser metalizadas con oro o grafito.

4.2.5 Caracterización mecánica

Para determinar el comportamiento físico y mecánico de los suelos en estudio y analizar la influencia de la meteorización en ellas, se ejecutaron ensayos de compresión simple, cizallamiento directo, compresión confinada, determinación de curvas características y el ensayo de tracción indirecta o diametral.

4.2.5.1 Ensayo de compresión simple

Este ensayo fue realizado según la Norma ASTM D2166-91, sobre muestras de los tres niveles de los perfiles de meteorización, Foto 4.8. Las muestras falladas fueron impregnadas y se preparó una sección delgada de la zona de falla para realizar un análisis comparativo de los cambios microestructurales.



Foto 4.8. Ensayo de compresión simple.

4.2.5.2 Ensayo de cizallamiento directo

A partir de este ensayo se determinaron los parámetros de resistencia (ángulo de fricción y cohesión), de los suelos en estudio. Los ensayos se ejecutaron sobre las muestras con su humedad natural siguiendo la Norma ASTM D3080-90.

4.2.5.3 Compresión confinada

El ensayo de compresión confinada se efectuó para evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación ante cargas compresivas de los suelos en estudio, siguiendo la Norma ASTM 2435-70, este ensayo fue realizado solo para muestras del nivel 1 y 3, debido a la disponibilidad de equipos y al tiempo de ejecución (10 días para cada ensayo). Los ensayos se realizaron en los laboratorios de Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia y en el Laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería de Antioquia.

4.2.5.4 Determinación de las curvas características

El comportamiento mecánico de los suelos no saturados se encuentra afectado por la succión (o capacidad de un suelo de retener agua capilar) en función de la variación de la humedad, por lo cual es importante la determinación de la curva característica para modelar sus procesos.

La succión total en un suelo es la suma de la succión matricial y la osmótica, en este trabajo fue determinada la succión matricial y no la total debido a que la succión matricial es el resultado de las fuerzas capilares y de absorción que surgen por la interacción del agua y las partículas sólidas del suelo, en cambio la osmótica es debida a las sales presentes en el agua que se encuentra en los poros, lo cual no aplica para esta investigación.

Este ensayo se ejecutó en la Universidad Nacional de Brasilia (UnB), siguiendo la metodología adoptada por Marinho (1995) para el ensayo con papel filtro, el cual modifica un poco la Norma ASTM D5298-92. Por ejemplo el papel filtro empleado que fue Whatman N° 42, no fue secado durante 16 horas antes de su uso, debido a que Marinho concluyó que esto afecta las características de absorción del papel y por ende la curva característica.

Este método se basa en que un suelo con cierta humedad, cuando está en contacto con un papel filtro de humedad menor, hace que este último absorba una cierta cantidad de agua del suelo hasta que el sistema entre en equilibrio, hay una relación entre la succión y la humedad del papel filtro y puede ser obtenida por la curva de calibración (Marinho, 1995).

Para humedades de papel filtro $> 47\%$, la succión (kPa) = $10^{(6.05-2.48 \cdot \log w)}$

Para humedades de papel filtro $\leq 47\%$, la succión (kPa) = $10^{(4.84-0.0622 \cdot w)}$

Fueron utilizados pastillas de suelo (cuerpo de prueba) de aproximadamente 5 cm de diámetro y 2 cm de espesor, con distintas humedades (Foto 4.9 y 4.10), sobre los cuales se colocaron tres papeles de filtro (Figura 4.1).



Foto 4.9. Cuerpos de prueba secados al aire.



Foto 4.10. Cuerpos de prueba humedecidos.

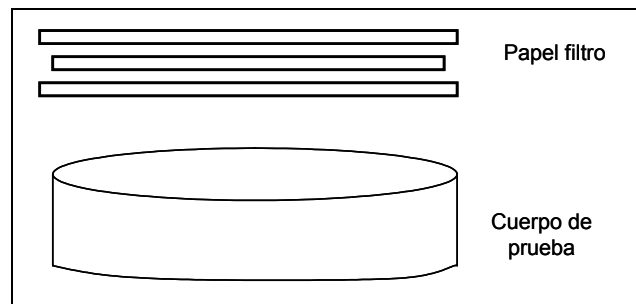


Figura 4.1. Ubicación de los papeles de filtro sobre los cuerpos de prueba.

El conjunto es envuelto en papel plástico tipo PVC y se dejan en una caja de icopor durante 15 días (Foto 4.11). Después de este tiempo es determinada la humedad del papel filtro del medio y el papel de encima, este último para

verificación de medidas (Foto 4.12), al papel filtro en contacto con la muestra no se le toma su humedad debido a que se encuentra contaminado con suelo. Al valor de humedad del papel filtro le corresponde un valor de succión que es el mismo del cuerpo de prueba.



Foto 4.11. Sellado de los cuerpos de prueba



Foto 4.12. Pesada papel filtro.

Posteriormente, la mitad de cada cuerpo de prueba fue cubierta con parafina y se determinó su peso específico por el método de balanza hidrostática, que consiste en colocar los cuerpos cubiertos con parafina dentro de agua y con la densidad de la parafina y del agua se determina la masa específica aparente, la relación de vacíos y la saturación de los cuerpos (Foto 4.13).



Foto 4.13. Determinación de peso específico.

4.2.5.5 Ensayo de tracción indirecta o diametral (point load test – Ensayo Brasileiro)

Este ensayo fue realizado en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Brasilia (UnB), en él se determina indirectamente la resistencia a la tracción de un material, aplicando una carga de compresión a lo largo de su eje. La ruptura es producida por tracción, teóricamente uniforme, atenuada en la región central del diámetro cargado (Figura 4.2) y donde:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

Con, D = Diámetro de la muestra
 L = Espesor de la muestra
 P =Carga

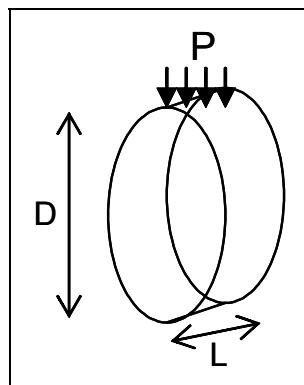


Figura 4.2. Ensayo de tracción indirecta (Duarte y Gomes, 2002).

El ensayo fue ejecutado sobre las pastillas de suelo sometidas al ensayo de succión, por lo cual cada uno tenía una humedad diferente (Foto 4.14 y 4.15). Luego de fallados los cuerpos, con la mitad de ellos se determinó la humedad y

con la otra parte se calculó el peso específico del suelo por el método de balanza hidrostática como se mencionó en el numeral 4.2.5.4 del ensayo de succión.



Foto 4.14. Ensayo de tracción directa.

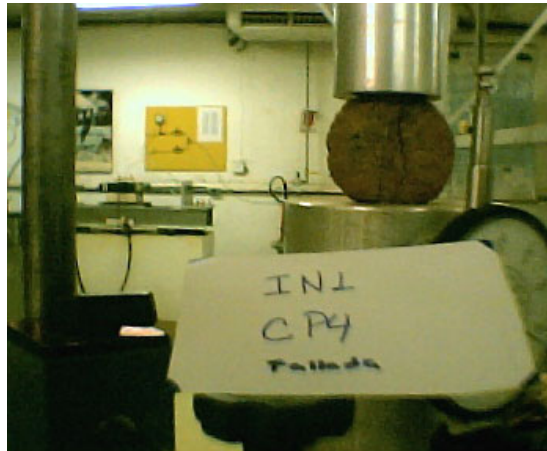


Foto 4.15. Cuerpo fallado por tracción directa.

Adicionalmente, este ensayo permitió la determinación de la cohesión aparente (c) para un determinado valor de succión ($u_a - u_w$) y ángulo de fricción con relación a la succión matricial (ϕ^b) Figura 4.3, de donde:

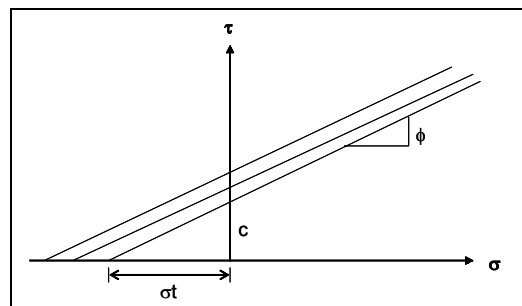


Figura 4.3. Cohesión aparente.

$$c = \sigma_t * \tan \phi$$

De la ecuación según Fredlund et al. (1978) de succión se tiene que:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

Admitiendo ϕ' y c' constantes, se puede determinar la parte de la resistencia proporcionada por la succión matricial. Esta resistencia fue considerada como el crecimiento de la cohesión dado por $\Delta c = (u_a - u_w) \tan \phi^b$, siendo la cohesión total la suma de la cohesión efectiva (c') y el crecimiento de la cohesión (Δc), se tiene que $c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$ y considerando que c' es un valor tan pequeño que no tiene peso en la ecuación (suelo no saturado), entonces:

$$c = (u_a - u_w) \tan \phi^b \text{ y}$$

$$\phi^b = ATAN\left(\frac{c}{(u_a - u_w)}\right)$$

En estas ecuaciones se tiene que:

τ = Resistencia al cizallamiento.

c' = Intercepto de la cohesión obtenida en suelo saturado.

c = Cohesión aparente para un valor dado de succión.

σ = Tensión normal.

ϕ' = Ángulo de fricción del suelo.

ϕ^b = Ángulo de fricción del suelo con relación a la succión matricial.

$(u_a - u_w)$ = Succión matricial.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados y el análisis de los ensayos de caracterización física, química, mineralógica y mecánica de los dos perfiles de origen metamórfico estudiados. Algunos de los resultados fueron comparados con dos perfiles de origen ígneo como el stock de Altavista (municipio de Itagui, Antioquia) y el stock de Ovejas (municipio de San Pedro, Antioquia), estudiados por Echeverri (2005).

5.1 Gravedad específica (Gs)

La Figura 5.1 presenta las variaciones de Gs con la profundidad para los perfiles de suelo de origen metamórfico e ígneo.

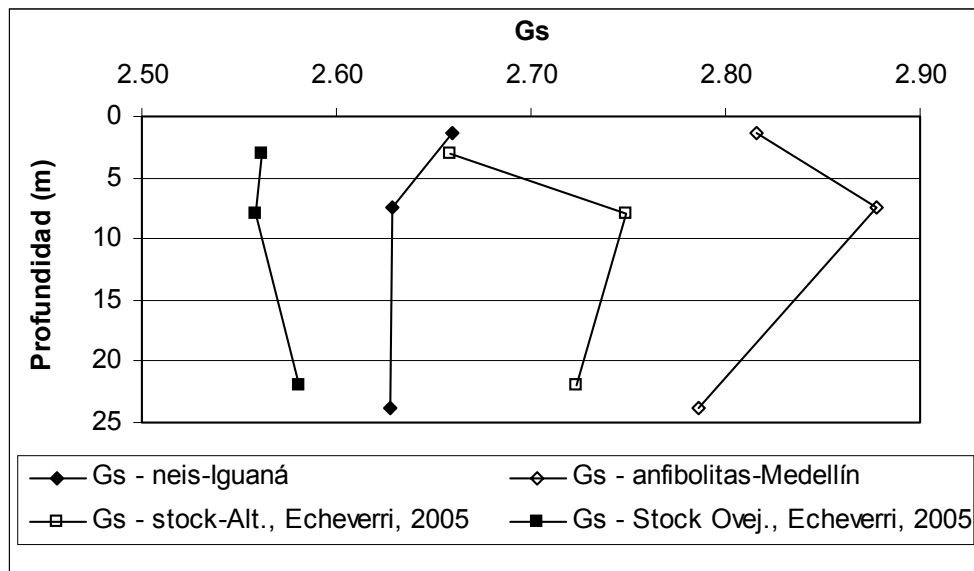


Figura 5.1. Gs de perfiles originados de rocas metamórficas e ígneas.

En profundidad la gravedad específica de los perfiles no presenta grandes variaciones, pero al comparar el neis con la anfibolita y las formaciones estudiadas por Echeverri (2005) se encuentran valores diferentes entre ellas, lo cual evidencia que estas presentan composiciones mineralógicas distintas, hecho que es confirmado con las proporciones de minerales presentes como se mostrará más adelante en los análisis de difracción de rayos-X.

2 Límites de Atterberg y humedad natural

La Figura 5.2 muestra la variación del límite líquido (w_l), límite plástico (w_p), índice de plasticidad (I_p) y humedad natural (w_n) en función de la profundidad para los perfiles originados de las rocas metamórficas.

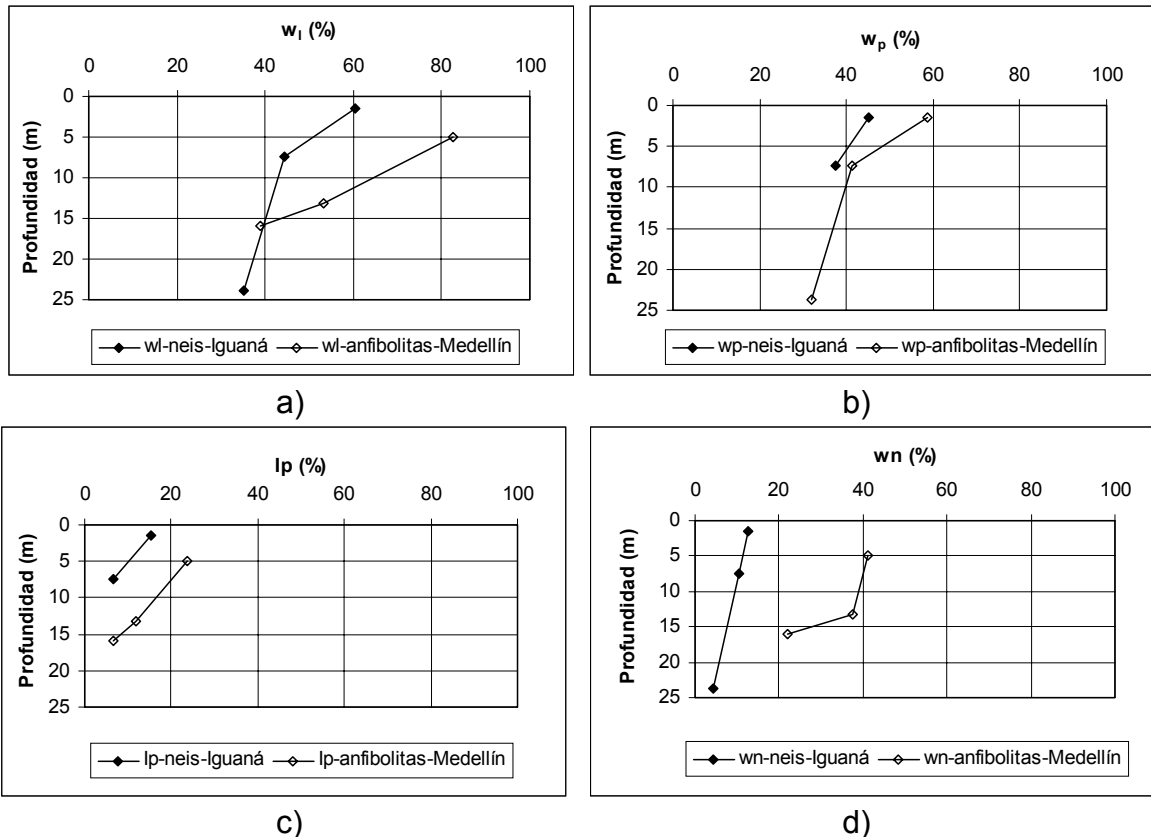


Figura 5.2. a) Variación de w_l , b) Variación de w_p , c) Variación de I_p , d) Variación w_n con la profundidad.

La Figura 5.2 a, b, c y d muestra una tendencia similar para los dos perfiles metamórficos estudiados, en los cuales a medida que aumenta la profundidad, disminuyen los índices de consistencia, de forma similar la humedad disminuye con la profundidad. Para el neis de la Iguaná, el nivel 3 no presenta características plásticas, hecho reflejado en su baja meteorización y su mayor tamaño de partícula. Con respecto a la humedad natural, ésta, para ambos perfiles y en todos los niveles se ubica por debajo del límite plástico (w_p) correspondiente y comportamiento que puede ser indicativo de que estos suelos se encuentran preconsolidados o desecados.

La reducción de la plasticidad con la profundidad está reflejando el hecho de que la meteorización es suficiente para alterar las propiedades físicas a lo largo de cada perfil; esta meteorización igualmente, genera minerales arcillosos hacia la superficie, los cuales presentan una mayor plasticidad. Adicionalmente, las variaciones del índice de vacíos, verificadas en la Figura 5.3, muestran que hubo

una pérdida de masa en los niveles más superficiales. O sea, como el producto más lixiviable es generalmente el más fino, se considera que grandes reducciones de plasticidad con la profundidad están reflejando una reducción en la meteorización.

5.3 Relación de vacíos

La Figura 5.3, muestra la variación de la relación de vacíos inicial (e_o) con la profundidad para los dos perfiles metamórficos y en la Figura 5.4 a y b, se observa la variación del límite líquido (w_l) y el límite plástico (w_p) con esta relación de vacíos.

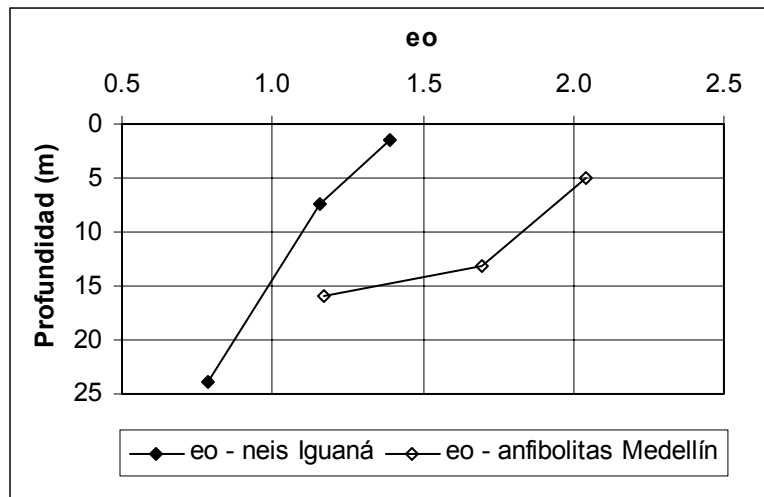


Figura 5.3. Variación de e_o con la profundidad.

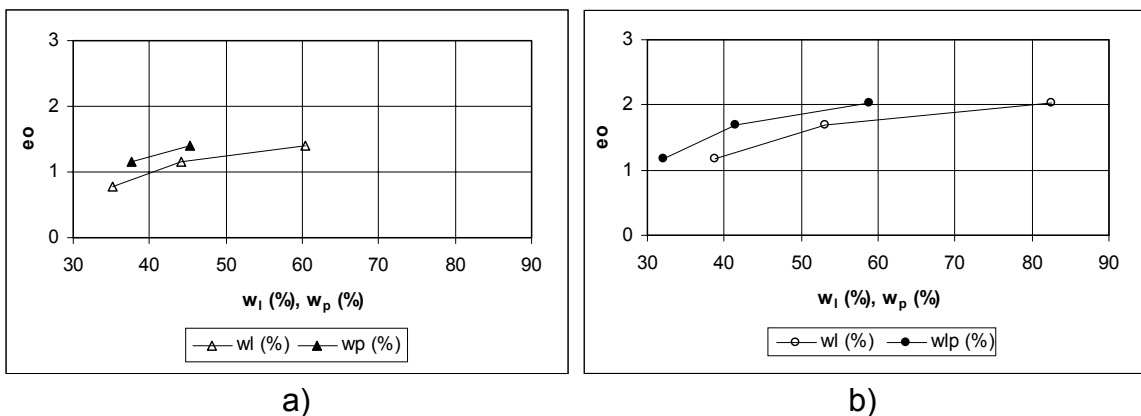


Figura 5.4 a) Relación entre w_l y w_p con e_o para el perfil originado del neis de la Iguaná, b) Relación entre w_l y w_p con e_o para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

De la Figura 5.3 se puede observar que el índice de vacíos inicial (e_o) para los perfiles, disminuye con la profundidad, debido a que la meteorización es mayor en

la superficie y normalmente en regiones tropicales y condiciones favorables de drenaje la lixiviación es decreciente (Camapum, 2004). Adicionalmente, en la Figura 5.4 se ve que a mayor relación de vacíos mayor límite líquido (w_l) y límite plástico (w_p), debido a que por efecto de la meteorización los minerales primarios generan minerales de arcilla en los niveles superiores (Camapum, 2004).

Los valores de relación de vacíos inicial (e_o) y relación de vacíos en el límite líquido (e_l) calculado como $e_l = (w_l * G_s) / 100$, con w_l como el límite líquido y G_s como la gravedad específica (Fookes, 2004); se presentan en la Tabla 5.1 y su relación en la Figura 5.5, la cual muestra que para suelos con relaciones por encima de la línea $e_o=e_l$, tienen tendencia a fluir al saturarse por efecto de intensos períodos de precipitación. En este caso, el perfil originado de las anfibolitas de Medellín es el sitio más crítico, por tener dos de sus niveles sobre la referida línea, para el cual se recomienda, estudiar más a fondo la variación del comportamiento mecánico con la succión y realizar un monitoreo climático y de humedad. Igualmente, es bueno tener cuidado con el comportamiento para el nivel 2 del perfil originado del neis de la Iguaná, debido a que este se encuentra prácticamente sobre la línea.

Tabla 5.1. Valores de e_o , e_l y n para los perfiles de origen metamórfico.

Nivel	Neis de la Iguaná			Anfibolitas de Medellín		
	e_o	e_l	n (%)	e_o	e_l	n (%)
1	1.39	1.58	58	2,04	2,29	67
2	1.16	1.14	54	1,70	1,50	63
3	0.78	0.91	44	1,17	1,06	54

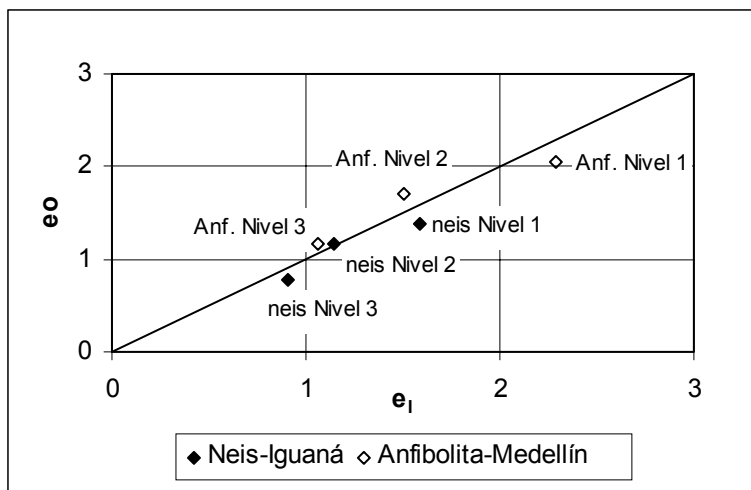


Figura 5.5. Relación entre e_o y e_l .

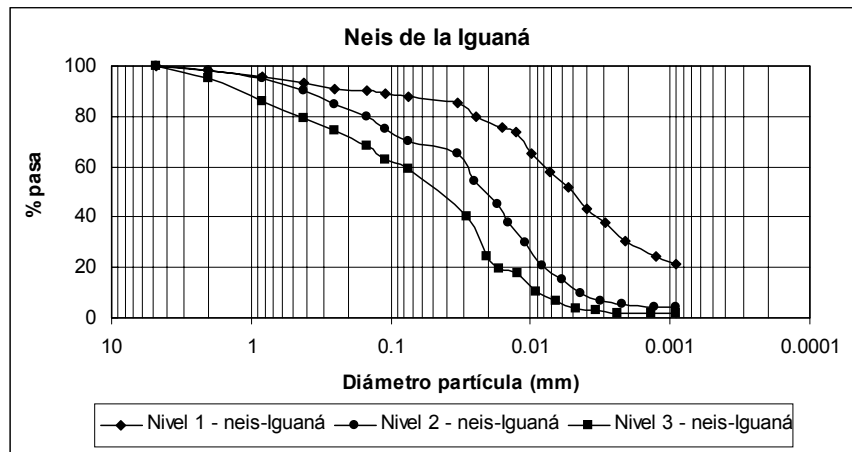
En algunos estudios como los adelantados por Araki (1997), se establece que el principal factor para que un suelo sea clasificado como colapsible (entendiendo por colapso, según Camapum (2004), una disminución en la resistencia al

cizallamiento de los vínculos que mantienen metaestable la estructura de un suelo), es presentar una porosidad (n) mayor del 40%, aunque es importante tener en cuenta que el colapso depende de otros factores tan o más importantes en ciertos casos que el valor de porosidad por si solo, como son el cambio del estado de esfuerzos y el tiempo de aplicación de la carga, entre otros.

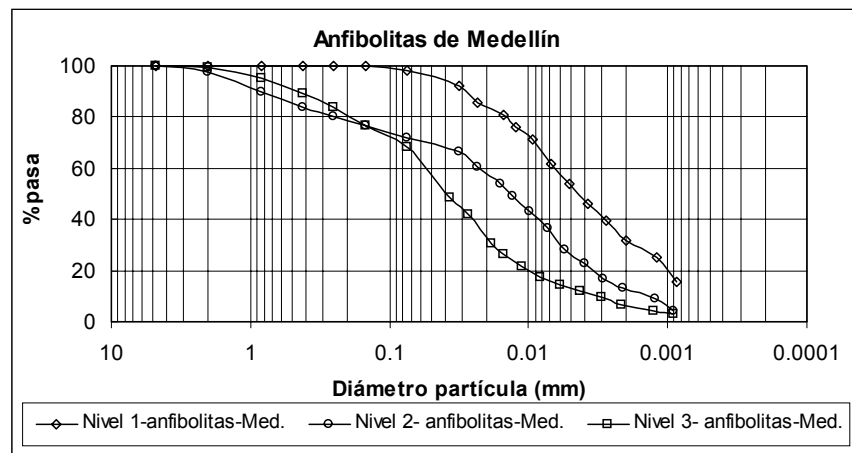
5.4 Análisis granulométrico

5.4.1 Granulometría mecánica y por sedimentación

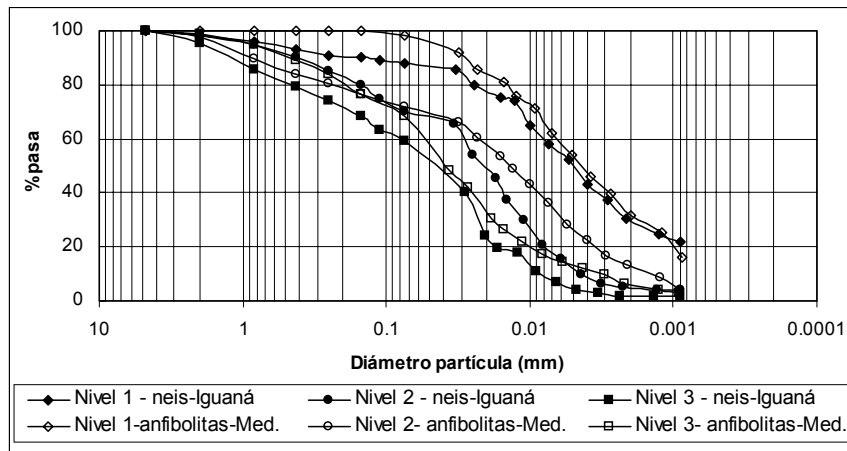
La Figura 5.6 muestra la granulometría por el método mecánico y de sedimentación, para los dos perfiles originados de rocas metamórficas.



a)



b)

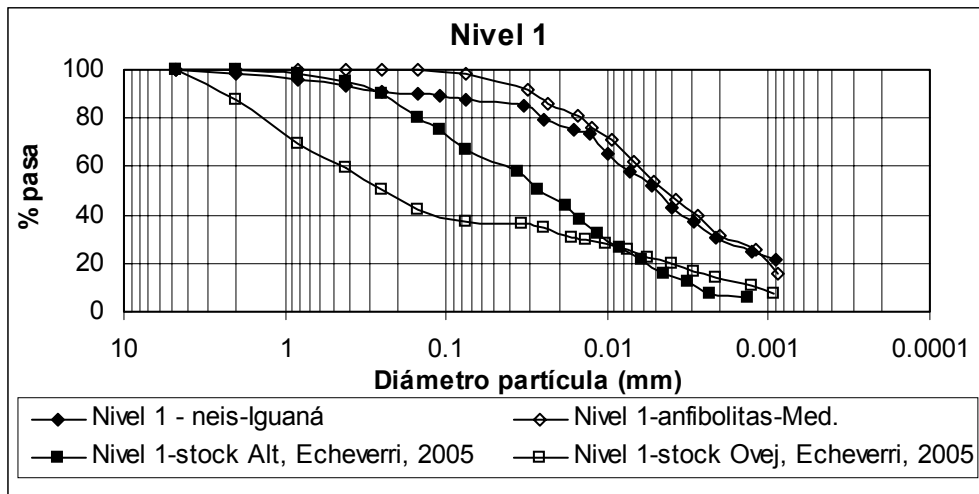


c)

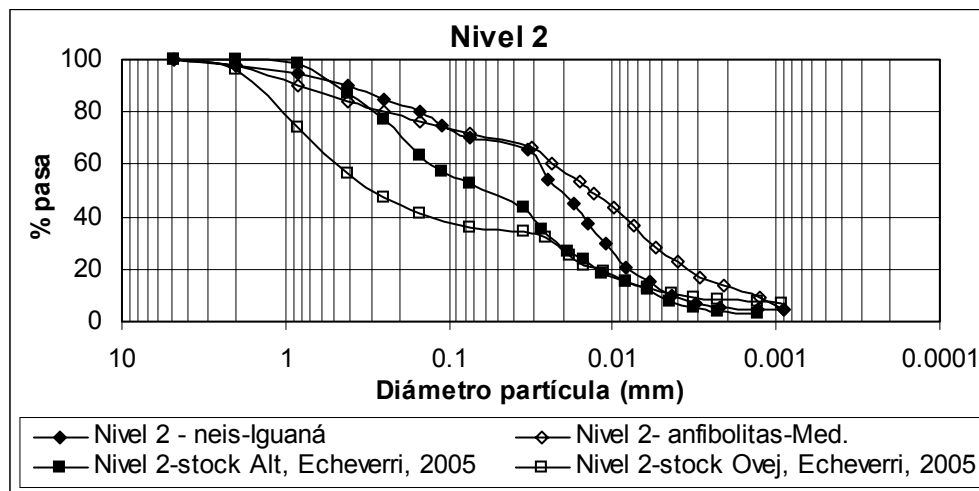
Figura 5.6. a) Variación granulometría – neis de la Iguañá, b) Variación granulometría – anfibolitas de Medellín, c) Granulometría perfiles originados de rocas metamórficas.

De la Figura 5.6 - a y b, se observa que hacia la superficie se tiene mayor cantidad de partículas finas y en mayor proporción tamaño limo, el nivel más profundo (nivel 3) es más arenoso, hecho reflejado, como se vio anteriormente, en un comportamiento no plástico. Los dos perfiles presentan distribución granulométrica similar tal como muestra la Figura 5.6 - c, aunque es un poco más fino el suelo del perfil de las anfibolitas que el del neis, lo cual puede deberse a que el perfil del neis de la Iguañá tiene una mayor proporción de minerales de cuarzo, como se verá en los análisis de difracción de rayos-X. Es importante resaltar que, a pesar que para los dos sitios las granulometrías son bastante semejantes, para un mismo nivel entre formaciones no fue observado el mismo comportamiento en el caso de la humedad natural y los límites de Atterberg, estos resultados indican que un análisis granulométrico por si solo no se constituye en una herramienta clasificatoria definitiva en la predicción del comportamiento de los suelos estudiados. Las diferencias en estas propiedades probablemente pueden estar asociadas a la mineralogía y a la química del suelo, analizada posteriormente.

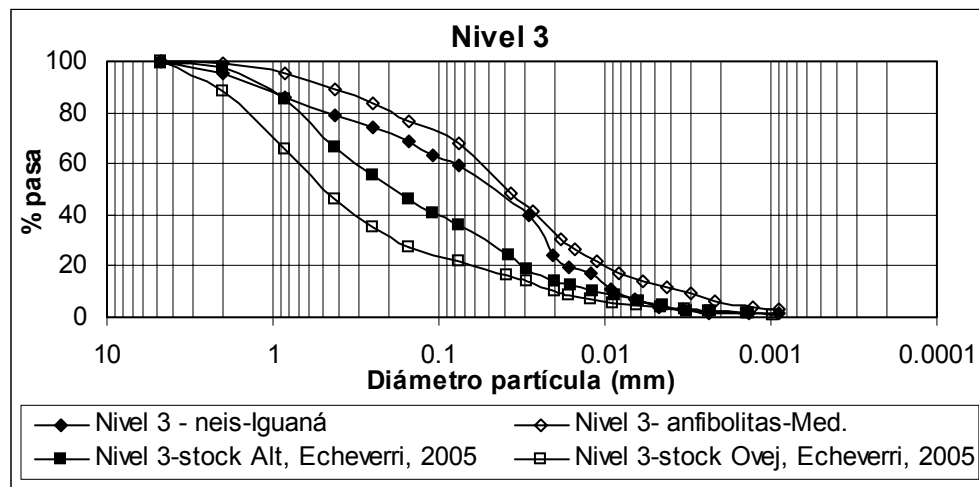
La Figura 5.7 a, b y c, muestra la distribución granulométrica de los dos perfiles de origen metamórfico y de los dos perfiles de origen ígneo obtenidos por Echeverri (2005). En esta Figura, se observa que los perfiles de origen metamórfico presentan mayor proporción de partículas finas que los perfiles de origen ígneo, lo cual puede deberse, sin ser el único factor determinativo (ya que existen otros factores como el tiempo de meteorización, las condiciones físicas de la roca, etc.), a que los minerales primarios metamórficos, tengan mayor facilidad de alteración por meteorización y que los perfiles de origen ígneos tengan mayor proporción de cuarzo que es el mineral resistado más común en este tipo de roca.



a)



b)

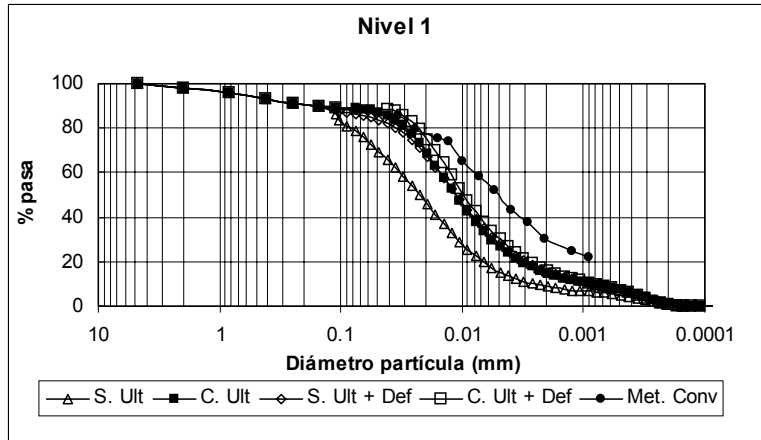


c)

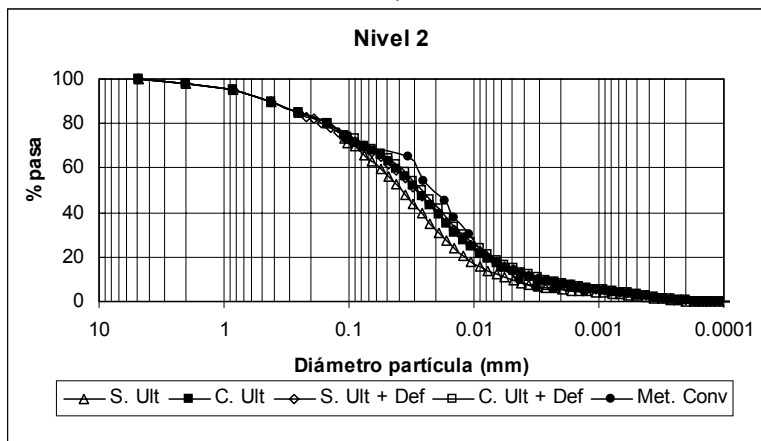
Figura 5.7. a) Granulometría nivel 1, b) Granulometría nivel 2 y c) Granulometría nivel 3 de perfiles originados de rocas metamórficas e ígneas.

5.4.2 Granulometría a partir del granulómetro láser

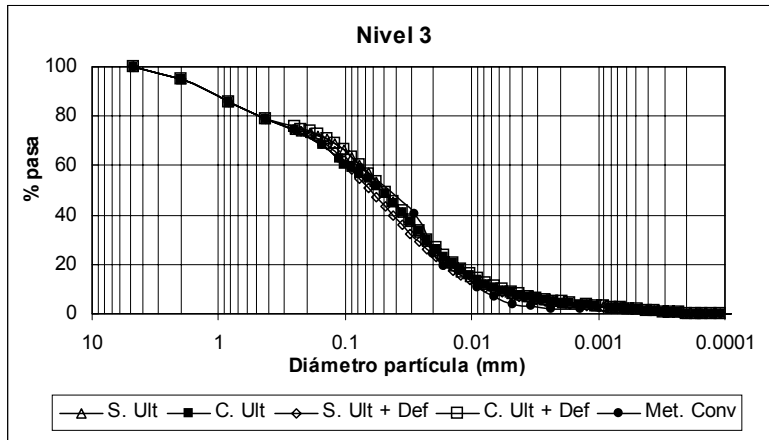
La clasificación granulométrica de la fracción que pasa el tamiz N° 100 (0.149 mm) hecha con el granulómetro láser sin defloculante y sin ultrasonido (S. Ult), sin defloculante y con ultrasonido (C.Ult), sin ultrasonido y con defloculante (S. Ult+Def) y con ultrasonido y defloculante (C. Ult+Def), se muestra en las Figuras 5.8 y 5.9 (a, b y c), donde adicionalmente se superpuso la curva granulométrica obtenida por el método mecánico y de sedimentación (Met. conv.).



a)

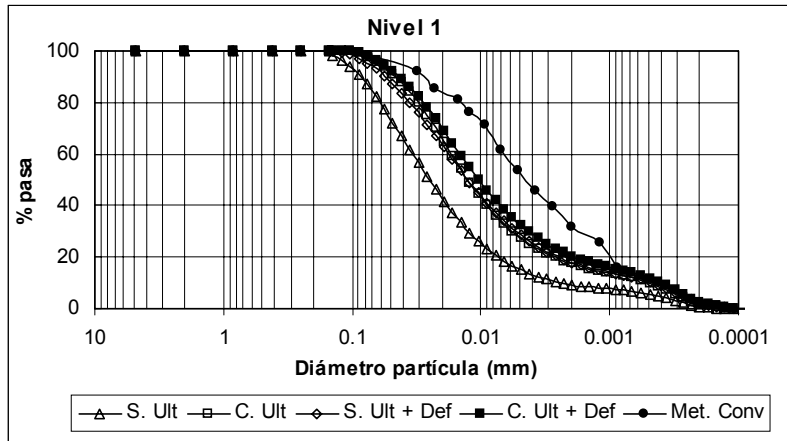


b)

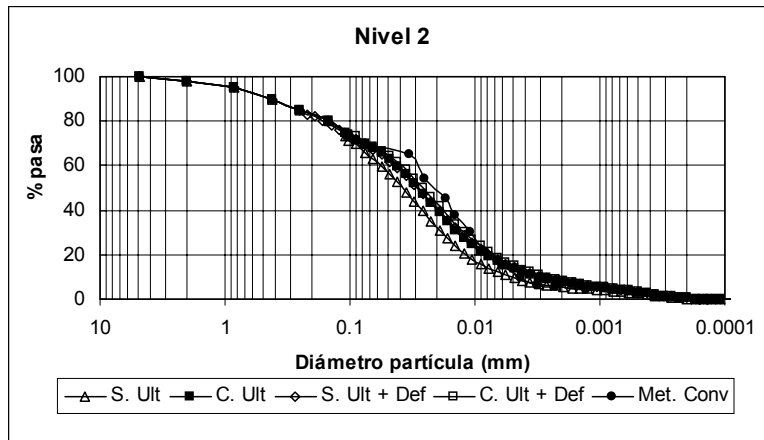


c)

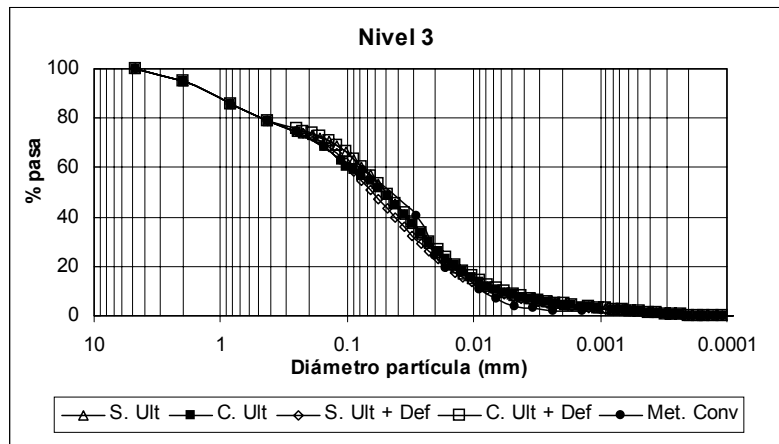
Figura 5.8. a) Granulometría nivel 1, b) Granulometría nivel 2 y c) Granulometría nivel 3 neis Iguaná – Método Granulómetro Láser y Convencional



a)



b)



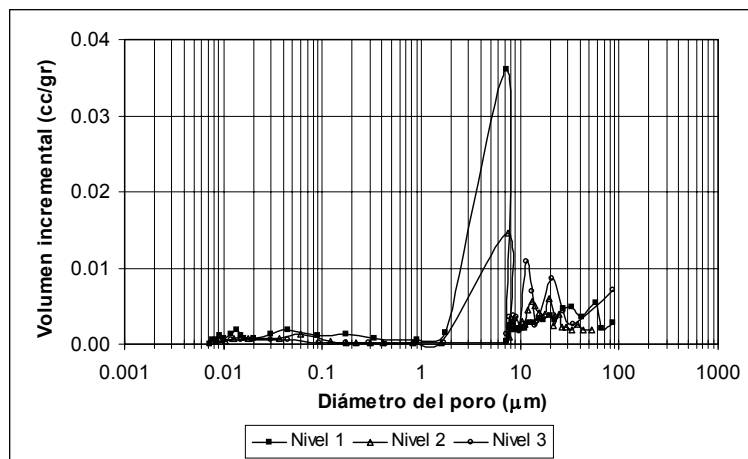
c)

Figura 5.9. a) Granulometría nivel 1, b) Granulometría nivel 2 y c) Granulometría nivel 3 anfibolitas de Medellín – Método Granulómetro Láser y Convencional

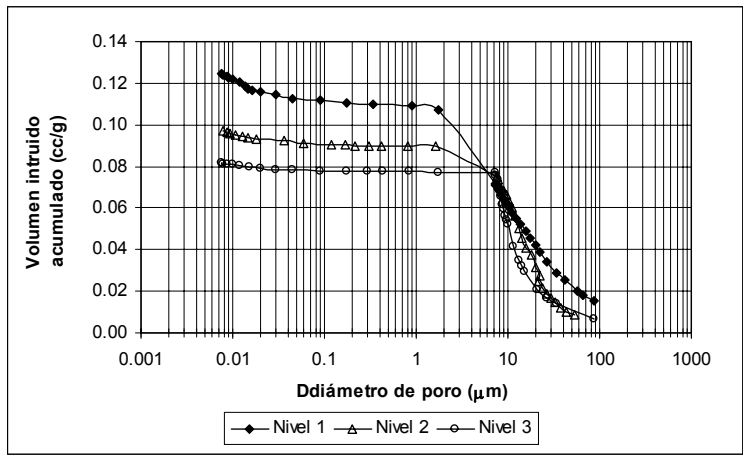
De estas Figuras se puede ver que las curvas granulométricas, utilizando el granulómetro láser y el método mecánico y de sedimentación son diferentes para el nivel 1, revelando que el método granulométrico utilizado, es importante en suelos más meteorizados, siendo que para los niveles de grano más grueso es independiente. Las diferencias entre las curvas con y sin agente defloculador reflejan la existencia de agregaciones, las cuales son inestables en presencia de aguas residuales, ya que neutralizan las cargas en los minerales (Donizete et al., 2003).

5.5 ENSAYO DE POROSIDAD

La distribución del tamaño de los poros en los suelos de cada uno de los niveles de los dos perfiles metamórficos se muestra en las Figuras 5.10 y 5.11.

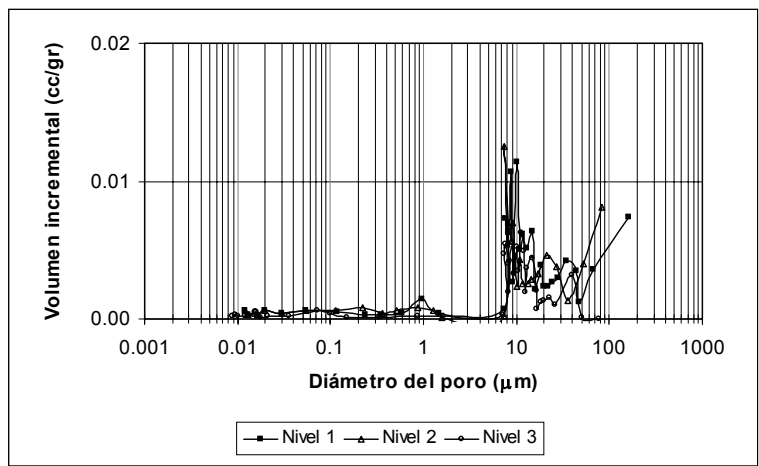


a)

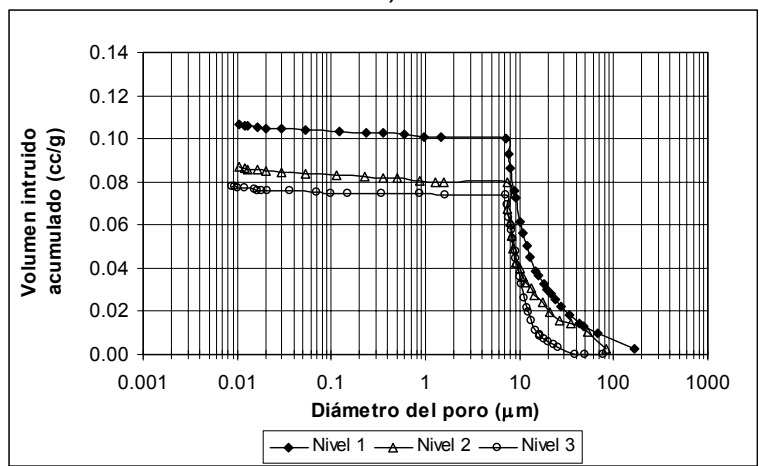


b)

Figura 5.10. a) Distribución tamaño de poros, b) Distribución acumulada de poro perfil originado del neis de la Iguaná



a)



b)

Figura 5.11. a) Distribución tamaño de poros, b) Distribución acumulada de poro perfil originado de las anfibolitas de Medellín

En ambos perfiles, los niveles se caracterizan por la presencia de macroporos, lo cual se refleja en una baja presión de entrada de aire en las curvas características de cada nivel y con variaciones prácticamente lineales después de esta entrada. De la Figura 5.10 – a) para el caso del perfil originado del neis de la Iguaá, en el nivel 1 y 2 los macroporos se encuentran entre $2\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$ y para el nivel 3 entre $9\mu\text{m}$ y $30\mu\text{m}$, pero con mayor cantidad de macroporos en los niveles superiores, lo cual está de acuerdo con los valores de relación de vacíos obtenidos. Para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín, en la Figura 5.11 – a) se observa que la distribución de macroporos se encuentra entre $8\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$ todos los niveles, pero, al igual que en el neis de la Iguaá, los niveles superiores acumulan mayor cantidad de mercurio (Figura 5.10 - b y 5.11 - b), entre $2\mu\text{m}$ y $90\mu\text{m}$, para el neis de la Iguaá y entre $10\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$, para las anfibolitas, coincidiendo este ensayo con los resultados de relación de vacíos obtenidos, donde la relación de vacíos disminuye con la profundidad y es mayor para el perfil de las anfibolitas que el perfil del neis.

5.6 CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES

La Tabla 5.2 muestra la clasificación de los dos perfiles de origen metamórfico utilizando la Norma BS 5930 y Brand, la clasificación unificada (U.S.C) y la clasificación MCT rápida.

Tabla 5.2. Clasificación de los perfiles.

Nivel	Norma BS 5930		Brand		Unificada (U.S.C)		MCT rápida	
	Neis Iguaá	Anfibolitas Medellín	Neis Iguaá	Anfibolitas Medellín	Neis Iguaá	Anfibolitas Medellín	Neis Iguaá	Anfibolitas Medellín
1	VI	VI	RS	RS	MH	MH	NS'-NG'	NG'
2	VI	VI	RS	RS	ML	MH	NS'	NS'-NG'
3	VI	VI	RS	RS	ML	ML	NS'-NA'	NS'

Según la clasificación por medio de la Norma BS 5930 y según Brand, todos los niveles en ambos perfiles se clasifican como VI y RS – Suelo residual, debido a que todo el material rocoso se transformó en suelo. De acuerdo con la Clasificación Unificada, todos los niveles se clasifican como limos, ya sea de alta plasticidad (MH) o de baja plasticidad (ML), siendo los niveles superiores los más plásticos, lo que está de acuerdo con los datos obtenidos mediante las curvas de granulometría, donde se puede ver que la mayor proporción de suelo es de partículas tamaño limo. Por el método MCT, los niveles fueron clasificados como NG' (Saprolítico arcilloso), NS' (Saprolito limo-arenoso) y/o NA' (arena-limosa), donde es de resaltar entonces que los perfiles son “No Lateríticos”, o sea, son suelos que presentan intemperización, pero no muy profunda, lo cual puede deberse a que los procesos erosivos locales juegan un papel importante, puesto que no permiten el desarrollo de perfiles maduros.

Es importante resaltar que una clasificación es complementaria con otra, como se ve por la clasificación de la Norma BS 5930 y Brand, el perfil clasifica todo como

VI y RS, en cambio con la clasificación MCT se tiene mucha mas información sobre las características del material.

De acuerdo con el cuadro comparativo de Nogami y Villibor (1995) (Tabla 4.2, Capítulo 4), los valores obtenidos por la clasificación Unificada y el método MCT, concuerda. La relación entre estos dos métodos de clasificación, se puede ver también en la directa proporcionalidad existente entre la humedad de moldeo de las bolas de suelo (w_b), por el método MCT, y el límite líquido (w_l), como lo muestra la Figura 5.12.

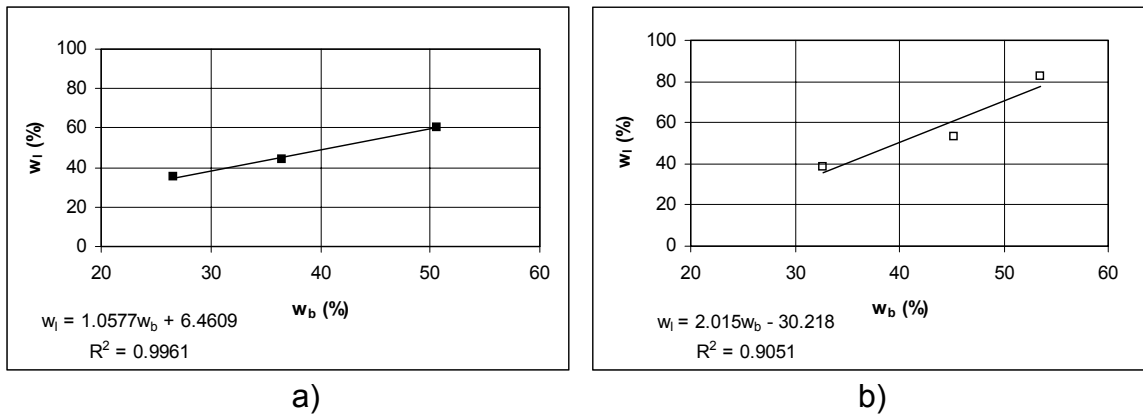


Figura 5.12. a) Relación $w_b - w_l$ neis de la Iguaná, b) Relación $w_b - w_l$ perfil anfibolita de Medellín.

Según este resultado, se puede observar que el límite líquido (w_l) puede ser razonablemente estimado a partir de los valores de w_b .

5.7 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La Tabla 5.3 muestra algunos de los resultados de los análisis químicos y el cálculo de la Actividad de los niveles según la clasificación pedológica de la EMBRAPA de Brasil, como C.I.C/(% arcillas con defloculante - % arcillas sin defloculante), y por el coeficiente de Skempton (Márquez, 1982) como I_p /% arcillas, para el neis de la Iguaná y las anfibolitas de Medellín; adicionalmente en la Figura 5.13, se presenta la relación entre la saturación de aluminio (%Al) y la saturación de bases (%B) para ambos perfiles y en la Figura 5.14, la relación entre el % de arcillas, la C.I.C y el I_p . Todos los datos sobre los análisis químicos se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 5.3. Análisis químico y Actividad del neis de la Iguaná y anfibolitas de Medellín.

Neis de la Iguaná									
Nivel	pH(KCl)	pH(agua)	dpH	% B	% Al	C.I.C	EMBRAPA	Skempton	Actividad
1	3.8	5.4	-1.6	11	75	11.79	1.77	0.50	Inactiva
2	4.1	5.7	-1.6	55	21	4.87	2.03	0.58	Inactiva
3	5.2	6.7	-1.5	75	2	5.92	2.96	-	Inactiva
Anfibolitas de Medellín									
Nivel	pH(KCl)	pH(agua)	dpH	% B	% Al	C.I.C	EMBRAPA	Skempton	Actividad
1	4.1	5.5	-1.4	21	52	6.36	0.16	0.60	Inactiva
2	4.5	6.5	-2.0	88	2	18.57	1.10	0.70	Inactiva
3	4.5	6.9	-2.4	89	1	16.58	2.57	1.04	Normal

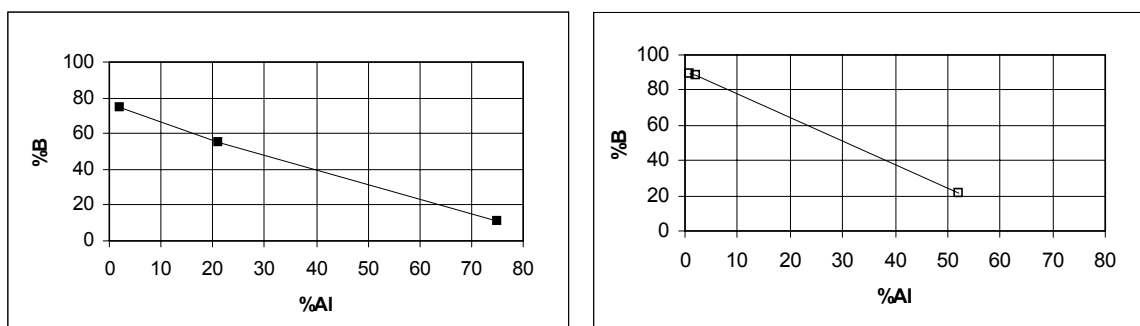
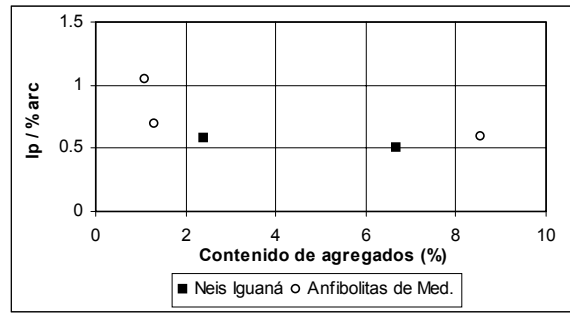
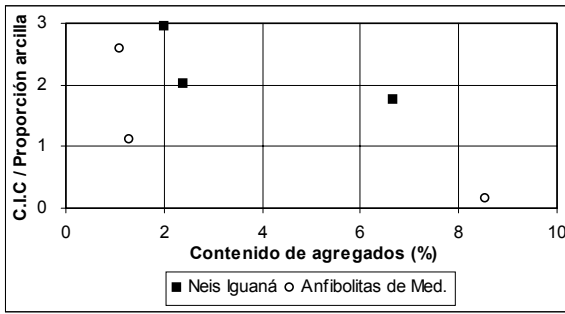


Figura 5.13. a) Relación entre %Al - %B, perfil originado del neis de la Iguaná, b) Relación entre %Al - %B, perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

De la Tabla 5.4 se puede inferir que, para el perfil originado del neis de la Iguaná, la Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.) está reflejando poca presencia de minerales de arcillas en el suelo o que estos tienen una baja C.I.C, como lo es el caso de la caolinita (Tabla 2.2, Capítulo 2). Para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín, la C.I.C. al igual que la Saturación de bases (%B) presentan valores mayores en el nivel 2 y 3, debido a que en estos dos niveles se tienen los valores más altos de contenido de calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Anexo 1), la Capacidad de Intercambio Catiónico en el nivel 1 se encuentra en el intervalo de arcillominerales de caolinita (Tabla 2.2, Capítulo 2). De la Figura 5.13 a y b se observa, que a medida que se disminuye en profundidad, el porcentaje de bases disminuye (%B) y los suelos se tornan más ácidos por aumento en la Saturación de Aluminio (%Al), esto ocurre por un incremento en la meteorización (Bueno et al., 2003). Adicionalmente, según la clasificación pedológica de la EMBRAPA de Brasil y por el coeficiente de Skempton, se puede concluir que éstas son en su mayoría inactivas, y en la Figura 5.14 se puede observar la relación que existente entre contenido de arcillas y la C.I.C y el I_p , si se aumenta la cantidad de minerales de arcilla, aumenta la C.I.C y el I_p .

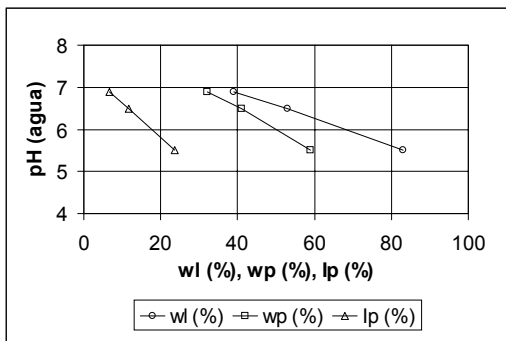
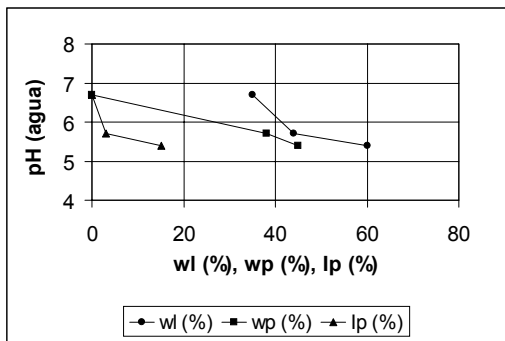


a)

b)

Figura 5.14. a) Clasificación EMBRAPA, b) Clasificación Skepmtón.

En las Figuras 5.15 y 5.16, se muestra la relación entre pH en agua y en KCl de cada uno de los perfiles.



a)

b)

Figura 5.15. a) Relación entre w_l , w_p , l_p y pH (agua) para el perfil originado del neis de la Iguaná, b) Relación entre w_l , w_p , l_p y pH (agua) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín

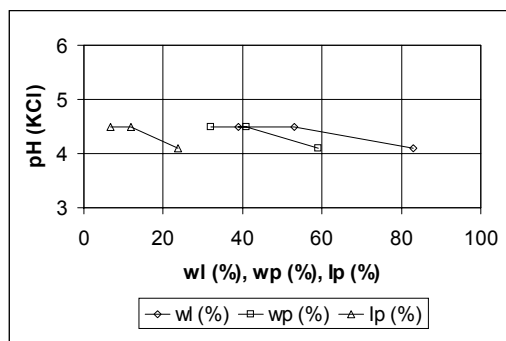
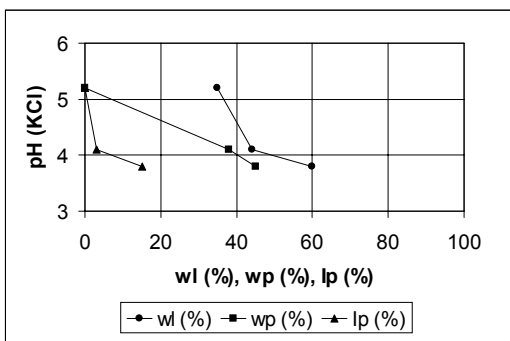


Figura 5.16. a) Relación entre w_l , w_p , l_p y pH (KCl) para el perfil originado del neis de la Iguaná, b) Relación entre w_l , w_p , l_p y pH (KCl) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín

El pH en agua del perfil originado del neis de la Iguaná está entre 5.4 y 6.7 y en KCl se encuentran entre 3.8 y 5.2. Para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín, el pH en agua está entre 5.5 y 6.9 y en KCl entre 4.1 y 4.5. En ambos perfiles los suelos van desde ácidos a prácticamente neutros. La tendencia

general en los perfiles es que el pH aumenta con la profundidad lo que está indicando el avance en meteorización hacia la superficie (Camapum, 2004). En las Figuras 5.15 y 5.16, donde se comparan las variaciones del pH (en KCl y agua) y del límite líquido (w_l), límite plástico (w_p) y el índice de plasticidad (I_p), se verifica que la reducción del pH está asociada al aumento de las propiedades de plasticidad, lo que puede deberse a que a menor pH, mayor presencia de minerales de arcilla, los cuales se caracterizan en la mayoría de los casos, por incrementar la plasticidad de los suelos. Adicionalmente, los valores negativos de ΔpH ($\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{agua}$), significan que la cantidad de aluminio intercambiable es elevada y que predominan las arcillas silicatadas, decreciendo los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, reflejando así una disminución en el nivel de meteorización a mayor profundidad; tal como se observa para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín, donde el ΔpH se hace menor con el incremento en la profundidad (Cruz, 2003).

Para los dos perfiles adicionales a cada perfil metamórfico, los resultados de los ensayos, se muestran en el Anexo 2 - a y b. Los perfiles en general presentan en gran parte la misma tendencia que los perfiles principales, tal como se observa en la Figura 5.17 y 5.18, donde se evidencia una lixiviación de Calcio (Ca), el Magnesio (Mg) y el azufre (S), así como un aumento relativo de Aluminio (Al), con el incremento en la intemperización. La diferencia más notoria la presenta el perfil 3 del neis de la Iguaná, lo cual puede deberse a que este se encuentra separado de los otros dos perfiles por una laguna, que puede estar generando condiciones de drenaje diferentes.

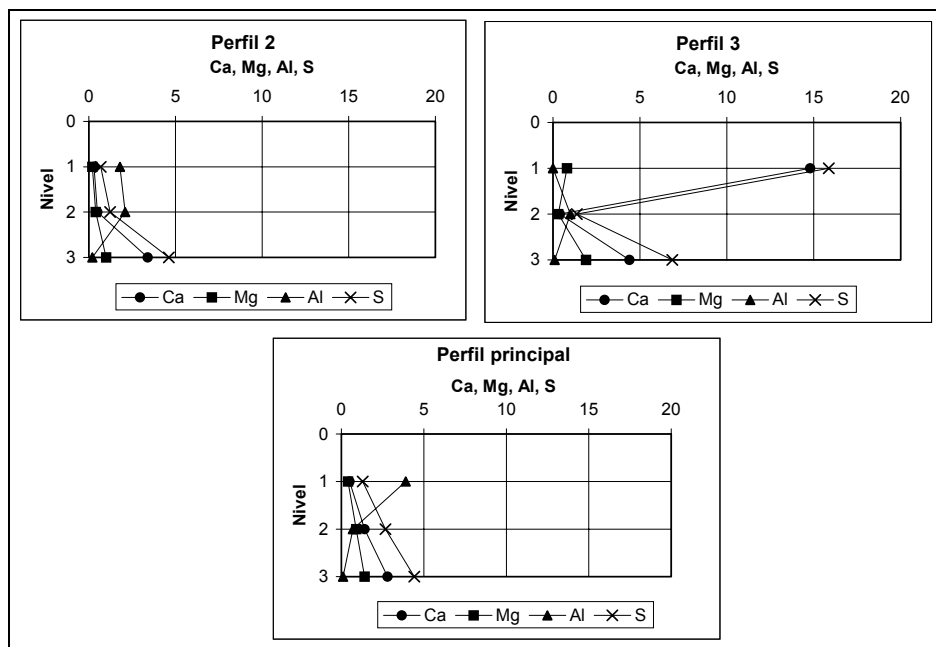


Figura 5.17. Variaciones químicas de los perfiles originados del neis de la Iguaná.

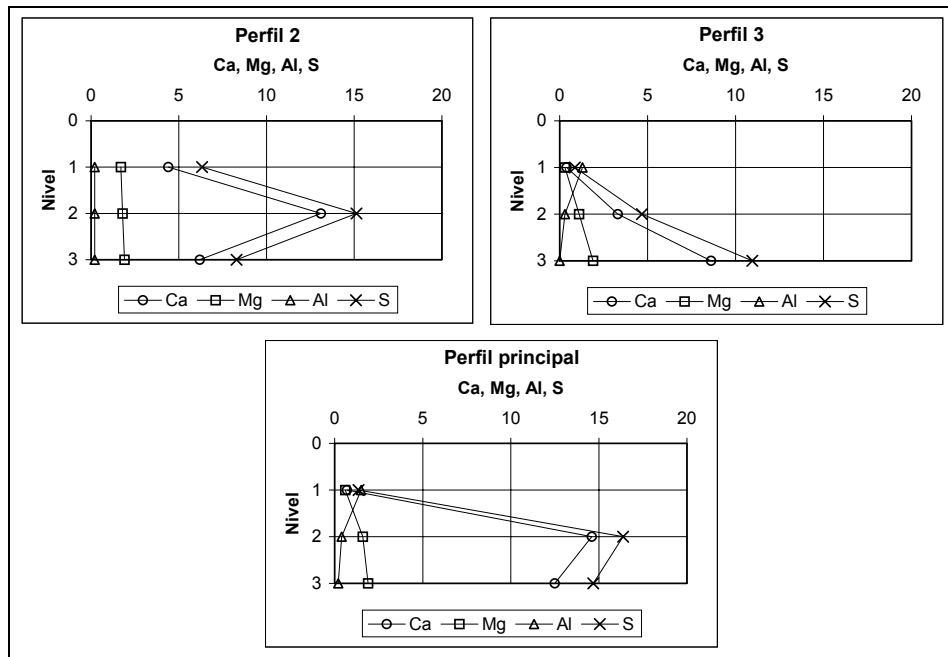


Figura 5.18. Variaciones químicas de los perfiles originados de las anfibolitas de Medellín.

5.8 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

5.8.1 Difracción de rayos-X

En la Figura 5.19 y 5.20 se muestran los difractogramas de rayos-X para los dos perfiles metamórficos incluyendo la roca (en el Anexo 3 se encuentran los difractogramas nivel por nivel). La Tabla 5.4, muestra las proporciones relativas de los minerales existentes en cada nivel, estas proporciones fueron calculadas a partir de las intensidades de los picos de los difractogramas.

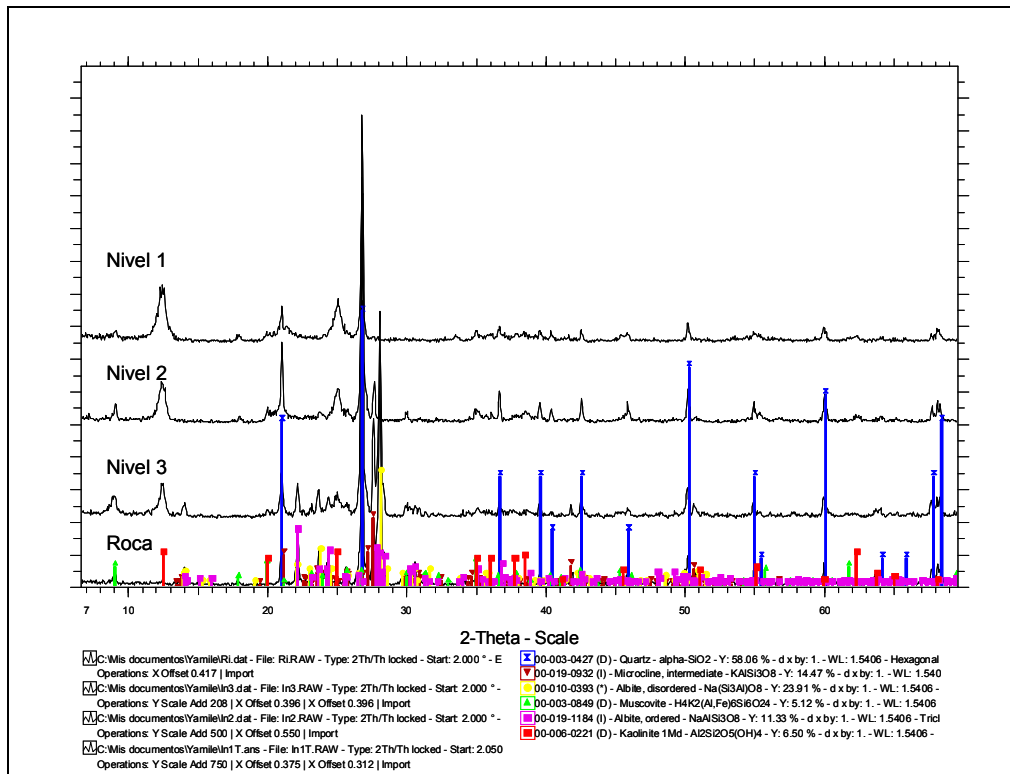


Figura 5.19. Driffractograma del perfil originado del neis de la Iguaçu.

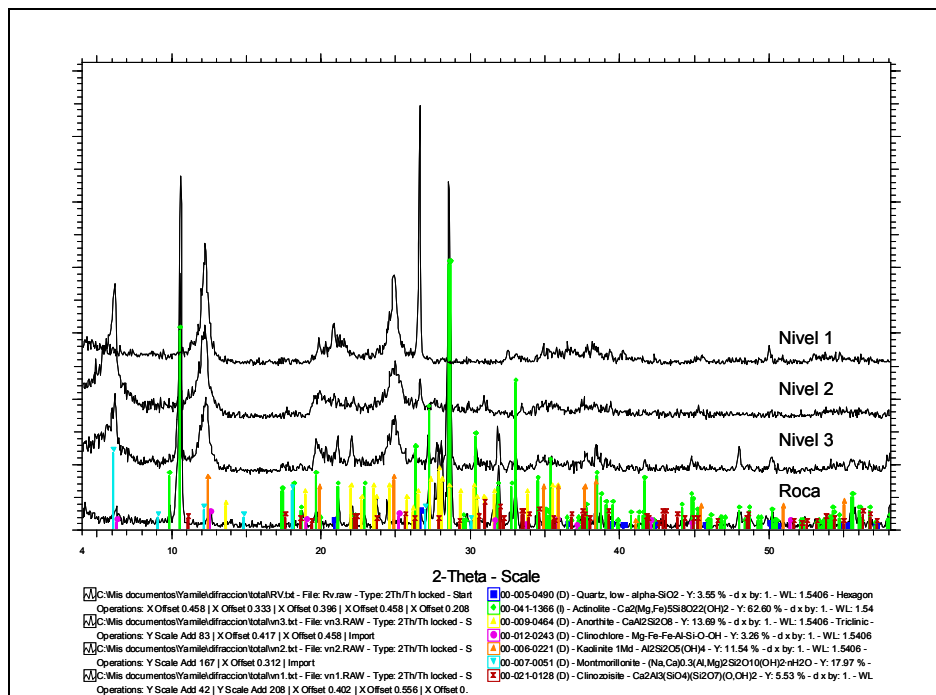


Figura 5.20. Driffractograma perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

Tabla 5.4. Minerales presentes en los dos perfiles metamórficos y sus proporciones relativas.

Nivel	Mineral	Formula	Proporción relativa (%)	Gravedad específica
Nivel 1	Neis de la Iguaná			
	caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	21.15	2.60-2.68
	cuarzo	$\alpha-SiO_2$	64.14	2.65
	moscovita	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	6.68	2.7-3.1
	ilita	$K(AlFe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$	8.02	2.6-2.68
Nivel 2	caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	8.14	2.60-2.68
	cuarzo	$\alpha-SiO_2$	80.77	2.65
	moscovita	$H_4K_2(Al,Fe)_6Si_6O_{24}$	7.73	2.7-3.1
	ilita	$K(AlFe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$	3.36	2.6-2.68
Nivel 3	caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	5.38	2.60-2.68
	cuarzo	$\alpha-SiO_2$	53.79	2.65
	moscovita	$H_4K_2(Al,Fe)_6Si_6O_{24}$	2.94	2.7-3.1
	microclina intermedia	$KAlSi_3O_8$	15.26	2.56-2.63
	albita desordenada	$Na(Si_3Al)O_8$	18.30	2.62
	albita ordenada	$NaAlSi_3O_8$	4.33	2.62
Roca	cuarzo	$\alpha-SiO_2$	54.27	2.65
	moscovita	$H_4K_2(Al,Fe)_6Si_6O_{24}$	4.54	2.7-3.1
	microclina intermedia	$KAlSi_3O_8$	15.11	2.56-2.63
	albita desordenada	$Na(Si_3Al)O_8$	17.69	2.62
	albita ordenada	$NaAlSi_3O_8$	8.38	2.62
Nivel 1	Anfibolitas de Medellín			
	actinolita	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	21.82	3.02-3.44
	anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	6.36	2.76
	caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	63.64	2.60-2.68
	clinozoisita	$Ca_2Al_3(SiO_4)(Si_2O_7)(O,OH)_2$	8.18	3.21-3.49
Nivel 2	actinolita	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	23.01	3.02-3.44
	anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	6.52	2.76
	caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	16.06	2.60-2.68
	montmorillonita	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_2O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	36.89	2.20-2.70
	cuarzo	$\alpha-SiO_2$	9.84	2.65
Nivel 3	actinolita	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	7.67	3.21-3.49
	actinolita	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	64.51	3.02-3.44
	anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	7.28	2.76
	caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	11.03	2.60-2.68
Roca	actinolita	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_2O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	17.18	2.20-2.70
	cuarzo	$\alpha-SiO_2$	3.93	2.65
	actinolita	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	69.38	3.02-3.44
	anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	20.91	2.76
	clinocloro	$(Mg,Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	5.78	2.6-2.9

La Figura 5.21 a y b, muestran las variaciones de estas proporciones relativas con la profundidad. Para el cálculo de las proporciones relativas en el nivel 1 del perfil originado de las anfibolitas, no se tuvo en cuenta el cuarzo, debido a que no es típico una cantidad tan alta de cuarzo en las anfibolitas, este resultado puede tener explicación debido a que en los análisis por difracción el cuarzo absorbe una gran cantidad rayos que hace perder la proporción de los otros minerales (adicionalmente como se verá mas adelante no se identificará por ni microscopía óptica, ni por SEM).

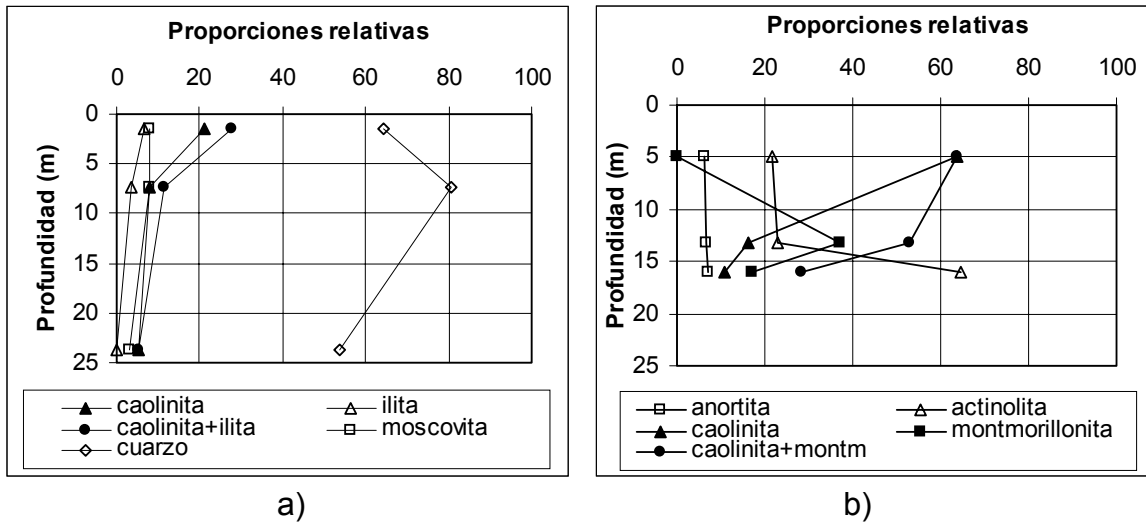


Figura 5.21. a) Variación de las proporciones relativas de los minerales con la profundidad para el perfil originado del neis de la Iguaçu, b) Variación de las proporciones relativas de los minerales con la profundidad para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

Para el perfil originado del neis de la Iguaçu, se tiene que en los niveles superficiales, las plagioclasas (albita) y los feldespatos (microclina) desaparecen, la moscovita y el cuarzo no presentan una tendencia particular, la caolinita y la ilita aumentan a medida que se disminuye en profundidad, lo cual indica una descomposición de la microclina y la albita con generación de caolinita. Evidenciando un proceso de meteorización en el perfil hacia la superficie, Figura 5.21 – a.

Con los valores de Gs y las proporciones relativas de los minerales de la Tabla 5.4, es posible calcular el valor promedio de Gs, el cual comparado con los valores de la Figura 5.1 permiten verificar el mineral con proporciones relativas predominantes, como es el caso del cuarzo. Con respecto a la C.I.C, en general los minerales de este perfil son bastante estables en presencia del agua y tienen una Capacidad de Intercambio Catiónico baja que coincide con el valor obtenido en los análisis químicos. Adicionalmente, los valores de pH obtenidos para este perfil y la abundante disponibilidad de agua en el sitio, favorecen la formación de minerales de caolinita en los niveles superiores. La alta proporción de cuarzo en el

Nivel 2 y 3 está en concordancia con la clasificación MCT, donde los suelos de dichos niveles se catalogaron como NS' (saprolito limo-arenoso).

En el perfil originado de las anfibolitas de Medellín, se observa que en los horizontes más superficiales aumenta la cantidad de caolinita y se tiene una tendencia a decrecer la plagioclasa (anortita) y la actinolita, evidenciándose que existe un proceso de meteorización (Figura 5.21 – b). Se tienen un evento particular, la presencia de montmorillonita en el nivel 3, que aumenta en el nivel 2 y desaparece en el nivel 1, esto se puede estar manifestando porque se perdió sodio (Na) y calcio (Ca) y se transformó en caolinita o que el sodio (Na) y el calcio (Ca) fueron transportados por drenaje a otros niveles.

El nivel 2 de las anfibolitas de Medellín tiene el mayor valor de gravedad específica, ya que presenta una considerable proporción de actinolita, mineral de gravedad específica alta (Tabla 5.4). La C.I.C. para los niveles 2 y 3 los cuales presentaron montmorillonita, fueron las mayores, mientras para el nivel 1, la C.I.C. apunta a la presencia de minerales como la caolinita, en concordancia con los datos de difracción de rayos-X. Los valores de pH en el nivel 1, favorecen la formación de minerales de caolinita, para los niveles 2 y 3 el alto contenido de calcio (Ca) y magnesio (Mg) propician la aparición de minerales de montmorillonita.

En la metodología MCT los niveles 1 y 2 corresponde al grupo NG' (arcillas limosas), coincide en cuanto a que son perfiles compuestos por minerales ricos en anfíboles. El nivel 3 es un perfil rico en feldespatos y filosilicatos, que lo clasifica como NS' (limos-arenosos).

A pesar de la caolinita tener baja plasticidad es el mineral más plástico de todos los presentes (a parte de la montmorillonita y de la ilita) en este perfil, la gran cantidad que se tiene de ella en las zonas superficiales, acompañada de los óxidos e hidróxidos de hierro, favorecen aparentemente a un valor mayor de límite de plasticidad. Para el caso del nivel 3 del Volador, el cual fue clasificado como de baja plasticidad ($I_p=7\%$), esta característica es acorde con la alta cantidad de fracción arenosa (32%) y la alta proporción relativa de actinolita.

Autores como Mesa y Solano (2004) a partir del “Índice de Alteración Caolínico” (I.A.C.), realizaron comparaciones del grado de alteración entre muestras del Stock de San Diego, este índice no tiene en cuenta el aporte de todos los minerales en el proceso de alteración solo los minerales más abundantes, por ello se determinó otro Índice de Alteración (I.A), el cual se establece como la relación existente entre la sumatoria de las proporciones relativas de los minerales secundarios (PR_s) y la sumatoria de la proporción relativa de los minerales primarios (PR_p), sin sumar el cuarzo por ser un mineral resistato. Por lo tanto se tiene:

$$I.A = \frac{\sum PR_s}{\sum PR_p}$$

En la Tabla 5.5 se muestra la intensidad de alteración de la muestra de acuerdo con este índice

Tabla 5.5. Intensidades de Alteración según el I.A.

Índice de Alteración (I.A)	Intensidad de alteración
$I.A > 1.5$	Completamente alterado
$0.5 < I.A \leq 1.5$	Medianamente alterado
$0.09 < I.A \leq 0.5$	Ligeramente alterado
$0 \leq I.A \leq 0.09$	Roca

Este Índice de variación es una propuesta a partir de las características físicas observadas en los dos perfiles y constatadas con otros perfiles de cada una de las formaciones estudiadas.

La calificación de intensidad de alteración desde ligeramente alterado a completamente alterado es una propuesta concebida a partir de los análisis químicos y mineralógicos; sin embargo, ella puede ser susceptible de ajustes, en la medida en que se disponga de mayor información, estadísticamente representativa. Adicionalmente, las proporciones relativas calculadas con los picos de los difractogramas, requieren ser usadas con mucho cuidado, ya que estas no solo dependen de la cantidad de mineral presente, si no de otros factores como, la absorción relativa de rayos-X, tendencia a la orientación preferencial de las partículas y el grado de cristalinidad, dentro de los más importantes pero en general, son un indicativo aproximado del cambio en las proporciones relativas de cada mineral entre las diferentes muestras, por lo que en principio pueden ser usadas en este sentido.

Las intensidades de alteración para los perfiles analizados se presentan en la Tabla 5.6, las cuales muestran una secuencia de alteración que va desde la roca hasta un material completamente alterado en la superficie.

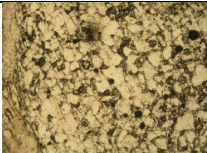
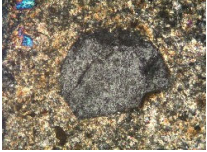

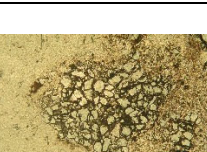
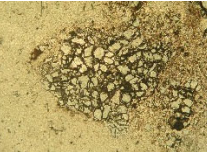
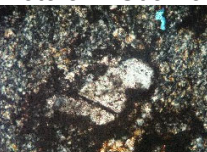
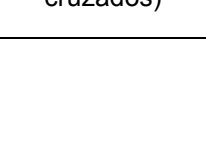
Tabla 5.6 Intensidades de Alteración en los dos perfiles metamórficos


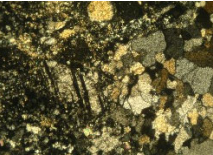

Neis de la Iguaná		
Nivel	Índice de Alteración (I.A)	Intensidad de alteración
1	4.4	Completamente alterado
2	1.5	Medianamente alterado
3	0.1	Ligeramente alterado
Roca	0	Roca
Anfibolitas de Medellín		
Nivel	Índice de Alteración (I.A)	Intensidad de alteración
1	1.7	Completamente alterado
2	1.4	Medianamente alterado
3	0.4	Ligeramente alterado
Roca	0	Roca

5.8.2 Microscopía óptica

En la Tabla 5.7 y 5.8, se muestra el análisis de las secciones delgadas (sin orientación determinada) por medio del microscopio petrográfico. Se observaron secciones de cada uno de los niveles de meteorización incluyendo la roca, tanto para las muestras inalteradas como para las falladas bajo el ensayo de compresión simple, buscando identificar los minerales presentes, el contacto entre ellos y las características de las fallas. Todas las fotos fueron tomadas a la misma distancia de foco.

Tabla 5.7. Descripción de minerales del neis de la Iguaná utilizando microscopio petrográfico.

Nivel	Mineralogía	Características	Microestructura general	Foto del mineral
Nivel 1	Cuarzo	Se observa en agregados con contactos poligonales, los cuales están muy fracturados (Foto 5.1).	Las microfracturas naturales no presentan disposición preferencial. Se hallan separando granos de cuarzo y rellenas bien sea por óxidos o por arcillas, con espesores entre 0.1 y 0.3 mm. Las fracturas inducidas son muy irregulares, onduladas, no están rellenas y no parecen tener alguna disposición, salvo, que como ya se indicó, una fractura separa parcialmente dos zonas con contenidos diferentes de óxidos, sin seguir ningún mineral específico. La más larga, es aproximadamente paralela a la dimensión mayor de la sección.	
	Feldespato potásico	Solo se observó un cristal, el cual presentaba macla de microclina (en enrejado) (Foto 5.2).		
	Óxidos e hidróxidos de hierro	Generalmente se observan como una mancha de color rojizo u ocre en toda la sección, inclusive como relleno de fracturas naturales (Foto 5.3). Debe mencionarse, sin embargo, que la distribución de estos óxidos no es la misma en toda la muestra y que la falla inducida separa, al menos parcialmente, dos zonas, una de color rojizo y otra de color ocre.		
	Arcillas	Se observan como manchas de color amarillento claro y sin ninguna disposición (Foto 5.3).		
Nivel 2	Cuarzo	Presenta contactos poligonales y fracturas aleatorias que se dan a lo largo de los contactos entre cristales, se observa muy limpio. Algunos cuarzos no están en contacto con la matriz arcillosa, sino que hay un espacio entre ellos y la matriz, generalmente es de 0.1mm o menos (Foto 5.4).	Foliación definida por bandas irregulares de arcillas Son pocas las fracturas observadas, se presenta una natural de hasta 1mm de espesor, de forma ondulada y paredes irregulares, rellena por arcillas y óxidos de Fe. La falla inducida se observa muy limpia, con 0.5 mm de espesor de carácter ondulado y paredes irregulares, que corta la matriz arcillosa y bordea los agregados de cuarzo.	
	Feldespato potásico	Muy escaso, se encuentra bastante alterado (arcillas), lo cual hace más visible la foliación, ya que las arcillas se disponen en bandas (Foto 5.5)		
	Plagioclasa	Se observan muy pocos cristales, fracturados y cementados por una matriz arcillosa		

	Óxidos e hidróxidos de hierro	Se disponen en bandas paralelas a las arcillas (Foto 5.6).		 <p>Foto 5.6. Óxidos y minerales de arcilla</p>
	Arcillas	Se presentan como constituyentes de la matriz, de colores claros.		
Nivel 3	Cuarzo	Se presenta limpio y poco fracturado, en general las fracturas no rompen los cristales, sino que se dan a lo largo de los contactos, definiendo superficies irregulares en varios sentidos, estas fracturas tienen aberturas menores de 0.1mm (Foto 5.7).	<p>Las fracturas naturales son onduladas al igual que la foliación (de apariencia milonítica), y se dan siguiendo los contactos entre la matriz recristalizada y los porfiroclastos. También se presentan fracturas ocasionales de gran tamaño, cuyas aberturas pueden alcanzar 0.5 mm, dispuestas subparalelamente a la longitud de la sección. Son generalmente irregulares, aunque no tanto como las presentes entre granos de cuarzo. En general, todas las fracturas se hallan abiertas, algunas presentan óxidos de hierro como relleno, derivado de epidotas.</p> <p>La falla inducida hace un ángulo de 66° con respecto a la dimensión mayor de la sección, tiene una amplitud que varía entre 2-3 mm, no está rellena. La falla es paralela a la foliación. Al interior de esta no se observan fracturas subordinadas. Es muy recta y plana. Al observar el espécimen fallado se puede afirmar que existen otras fracturas en la superficie del cilindro, de este modo, la falla de la sección no es la única, lo que sugiere que puede haber más de un mecanismo de falla involucrado.</p>	 <p>Foto 5.7. Cuarzos y plagioclasas</p>
	Feldespatos potásicos	Este mineral se encuentra fuertemente intemperizado, lo cual hace más notoria su foliación.		
	Plagioclasa	Se encuentra bastante meteorizada. Como característica particular presenta fracturas por alteración, con aberturas hasta de 0.2 mm, sin relleno (Foto 5.7).		
	Epidota	Se presenta en pequeños cristales, alargados, en bandas discontinuas debido a su deformación y se están oxidando.		
	Óxidos e hidróxidos de hierro	Se encuentran relleno algunas fracturas (Foto 5.8).		 <p>Foto 5.8. Óxidos de hierro</p>


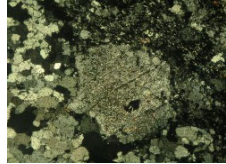

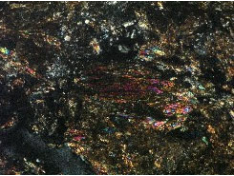
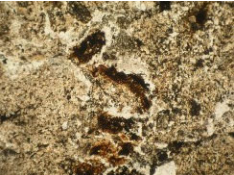
Roca	Cuarzo	Distribución bimodal de tamaños, unos muy pequeños y otros muy grandes; generalmente, los contactos entre granos son poligonales. Este cuarzo presenta una fuerte orientación definiendo un "stretching lineation" (Foto 5.9).	Foliación de apariencia milonítica definida por el cuarzo, feldespato potásico y la epidota. Una segunda foliación milonítica se insinúa en los cuarzos y es oblicua con respecto a la principal. La orientación preferencial de la sección es de 30° respecto a la longitud mayor de la placa.	
	Feldespato potásico	Presenta también una distribución bimodal de tamaños, aunque los cristales son más pequeños. Algunos presentan macla de microclina. Este mineral también define un "stretching lineation", el cual se hace más notorio debido a su alteración a una arcilla y a la deformación de la epidota (Foto 5.10).	La roca presenta algunas fracturas abiertas paralelas a la foliación principal y que cortan a todos los minerales.	
	Plagioclasa	Albita bien maclada, su orientación no es tan fuerte como en los minerales anteriores. Presenta microfallas, las cuales no afectan a la roca en conjunto. Algunas de las maclas están dobladas (Foto 5.11).		
	Epidota	Se presenta generalmente en pequeños cristales, es el mineral que le confiere más orientación a la roca, ya que se presenta alargado y en bandas discontinuas debido a su deformación. Presenta un pleocroísmo de incoloro a amarillo pálido		
	Esfena	Se encuentra en pequeños cristales de color pardo, relieve muy alto y colores de interferencia de color rojizo.		

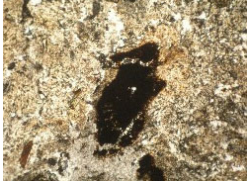
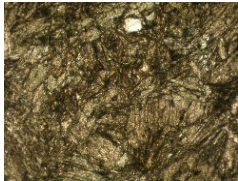
Foto 5.9. Cuarzo

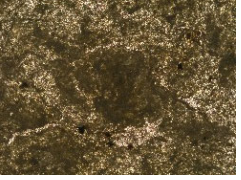
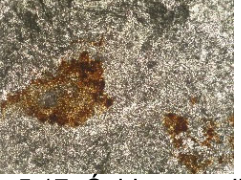
Foto 5.10. Feldespato potásico

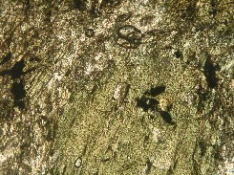
Foto 5.11. Plagioclasa (nicols cruzados)

Tabla 5.8. Descripción de minerales de las anfibolitas de Medellín utilizando microscopio petrográfico.

Nivel	Mineralogía	Características	Microestructura general	Foto del mineral
Nivel 1	Cuarzo	Es muy escaso, generalmente se observa limpio, y con pocas fracturas, presenta un tamaño de 0.5 mm o menor. Se presenta en franjas con un ancho de 1.5 a 2 mm y cementados por óxidos.	La muestra presenta un bandeo definido por la alternancia de capas de óxido de diferentes tonalidades, algunas de las cuales presentan cuarzos, este bandeo es visible al ojo y es perpendicular a la longitud de la sección	
	Anfíbol	Son los agregados de cristales con relieve un poco más alto que el del cuarzo, presenta clivaje en dos direcciones, son incoloros y con colores de interferencia de primer orden (Foto 5.12). Conforman algunos sectores claros de la sección.	Se observan dos fracturas naturales muy prominentes aproximadamente a 60 y 45° de la longitud mayor de la sección, muy planas y rellenas por óxidos o hidróxidos de hierro y otras de carácter irregular con aberturas de 0.1 mm, también rellenas por óxidos de hierro. A lo largo de la fractura natural más predominante ha ocurrido la falla de la muestra.	Foto 5.12. Anfíboles (nicos cruzados)
	Óxidos e hidróxidos de hierro	Pueden distinguirse dos tipos, uno de color pardo que se encuentra en la matriz de la sección y otro de color morado oscuro o negro que se encuentra relleno de fracturas, los pardos manchan algunos agregados de anfíbol (Foto 5.13).		
	Arcillas	Se presentan como constituyentes de la matriz, de colores claros (Foto 5.13).		Foto 5.13. Óxidos y minerales de arcilla.
Nivel 2	Anfíbol	Se presenta en pequeños cristales formando bandas, muy decolorado, con oxidación (Foto 5.14).	La muestra tiene un aspecto brechoide, ya que si bien se conservan algunos rasgos de foliación, esta no conserva el mismo ángulo en toda la muestra.	

	Óxidos e hidróxidos de hierro	Pueden distinguirse dos tipos, uno de color pardo que se encuentra sin ninguna disposición en la matriz de la sección y otro de colores pardos que manchan algunos agregados de anfíbol (Foto 5.14).	<p>Son varias las microfracturas inducidas observadas. La más grande se encuentra en la región donde la oxidación es más evidente, siendo su tendencia general perpendicular a la longitud de la sección, su superficie es ondulada, tiene aberturas hasta de 1.5 mm. De manera subparalela a esta se desarrollan algunas fracturas hasta de 0.2 mm de espesor, que también se hallan abiertas. Un conjunto oblicuo de fracturas se está desarrollado incipientemente.</p> <p>Se destaca una falla de carácter frágil dispuesta a 70° de la longitud de la sección. Presenta una traza recta y puede dividirse en 2 segmentos, uno en el cual los bloques adyacentes están en contacto y otro se encuentran separados, este último cercano a la primera fractura descrita.</p> <p>En general son pocas las fracturas que siguen la foliación de la roca, la falla se da por los cementantes de óxidos de hierro, con espesores en su mayoría inferiores a 0.1 mm.</p>	 <p>Foto 5.14. Anfíboles, arcillas y óxidos</p>
	Arcillas	Se presentan como constituyentes de la matriz, se hallan muy manchadas por óxidos, por lo cual su distinción es difícil (Foto 5.14).		
Nivel 3	Anfíbol	Tamaño promedio de 0.5 mm, se encuentra en agregados monominerales con una foliación tosca, lo cual es visible en fragmentos cuya orientación no coincide entre sí (Foto 5.15).	Brechoide, esta muestra corresponde a una brecha derivada de una anfíbolita, como se infiere a partir de los fragmentos de anfíbolita que contiene y que no presentan una foliación concordante.	 <p>Foto 5.15. Anfíbol</p>

Sausurita (plagioclasa que se transforma en epidota)	Se observa a manera de manchas compuestas por cristales muy pequeños de minerales del grupo de la epidota; en algunos casos los cristales permiten afirmar con claridad la presencia de epidota. Este grupo de minerales es producto de la alteración de plagioclasas cálcicas. El tamaño de estos agregados varía entre 0.3-1 mm (Foto 5.16).	<p>Las Microfracturas naturales se presenta varios tipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Las que se encuentran al interior de los fragmentos y son paralelas o perpendiculares a la foliación contenida en ellos, siendo más comunes las paralelas, generalmente no están rellenas, aunque algunas contienen óxidos. Su tamaño es menor de 0.1 mm. 2. Fracturas paralelas o subparalelas a la longitud de la sección, tienen abertura variable, hasta de 0.5 mm, no están rellenas y bordean agregados de anfíboles. <p>La fractura inducida más visible tiene una amplitud variable, con máximo de 1.5 mm en la periferia de la sección, la cual es una fractura preexistente, ya que en los contactos con las paredes del suelo estos presentan óxidos. Es muy irregular, aunque es aproximadamente perpendicular a la dimensión mayor de la sección. En general, las fracturas naturales fueron los planos de debilidad por los cuales ocurrió la falla, en algunas incluso el relleno ha sido desplazado.</p> <p>En este nivel los poros de la muestra son generalmente de forma irregular, algunos son alargados, hay una ligera tendencia a alinearse con la longitud de la sección.</p>	 <p>Foto 5.16. Sausurita</p>  <p>Foto 5.17. Óxidos y arcillas</p>
Plagioclasas	Se presentan muy pocos cristales con macla de albita, cuyo tamaño no supera 0.3 mm		
Cuarzo	Está concentrado en algunas zonas, ya sea como bandas o "grumos", presenta contactos poligonales y tamaño de 0.1 mm o menor.		
Arcillas	Se encuentran como motas en la matriz de la sección, presentan un color de interferencia gris (Foto 5.17).		
Óxidos e hidróxidos de hierro	Son muy escasos, se dan principalmente por la alteración del anfíbol, están concentrados principalmente a lo largo de microfracturas.		

Roca	Anfíbol	Presenta de relieve alto, con cristales subhedrales .El clivaje es romboédrico y esta orientado siguiendo la foliación de la roca (Foto 5.18).	<p>Los anfíboles (hornblendas) definen tanto una esquistosidad como una linealidad, siendo predominante la esquistosidad (orientación planar)</p> <p>La roca presenta muy pocas fracturas, las cuales son subparalelas a esta foliación y se encuentran rellenas de óxidos e hidróxidos de hierro en algunos casos.</p> <p>El ángulo entre la foliación y la longitud mayor de la sección es de 42°</p>	 <p>Foto 5.18. Anfíbol, plagioclasas, esfenas y óxidos</p>
	Cuarzo	Es incoloro y está muy limpio, presenta contactos poligonales, además se observa en bandas discontinuas paralelas a la foliación.		
	Plagioclasa	De relieve bajo, es incolora, presenta diferentes grados de saurización (agregado de minerales del grupo de la epidota), está débilmente maclada, lo cual impide determinar su composición (Foto 5.18).		
	Esfena	Se presenta en cristales pequeños de relieve muy alto, color pardo y colores de interferencia rojizos.		
	Óxidos	Se observa como una patina de color pardo en algunas hornblendas (Foto 5.18).		

En el análisis por microscopía óptica, se observa que para el perfil originado del neis de la Iguaná, el cuarzo y el feldespato se observan en todos los niveles, se pierden las plagioclasas, la epidota y la esfena y se ganan óxidos e hidróxidos de hierro y minerales de arcilla, a medida que se acerca mas a la superficie. Para el perfil originado de las anfíbolitas de Medellín, desaparecen el cuarzo, los anfíboles, las, plagioclasas y esfenas y aumentan los óxidos e hidróxidos de hierro y minerales de arcilla como en el neis, al acercarse a la superficie.

5.8.3 Microscopía electrónica de barrido “Scannig Electrón Microscope” (SEM)

Las Figuras 5.22 a 5.27 muestran las imágenes de los trozos de muestra inalterada analizadas en el SEM de la empresa FURNAS de Brasil, acompañadas de un microanálisis químico. Aunque esta técnica de análisis microscópico no se utilice para análisis mineralógico, ella puede ayudar en la identificación de determinadas formas de cristales de los probables minerales presentes en el suelo; en las Figuras a continuación se observa esta asociación.

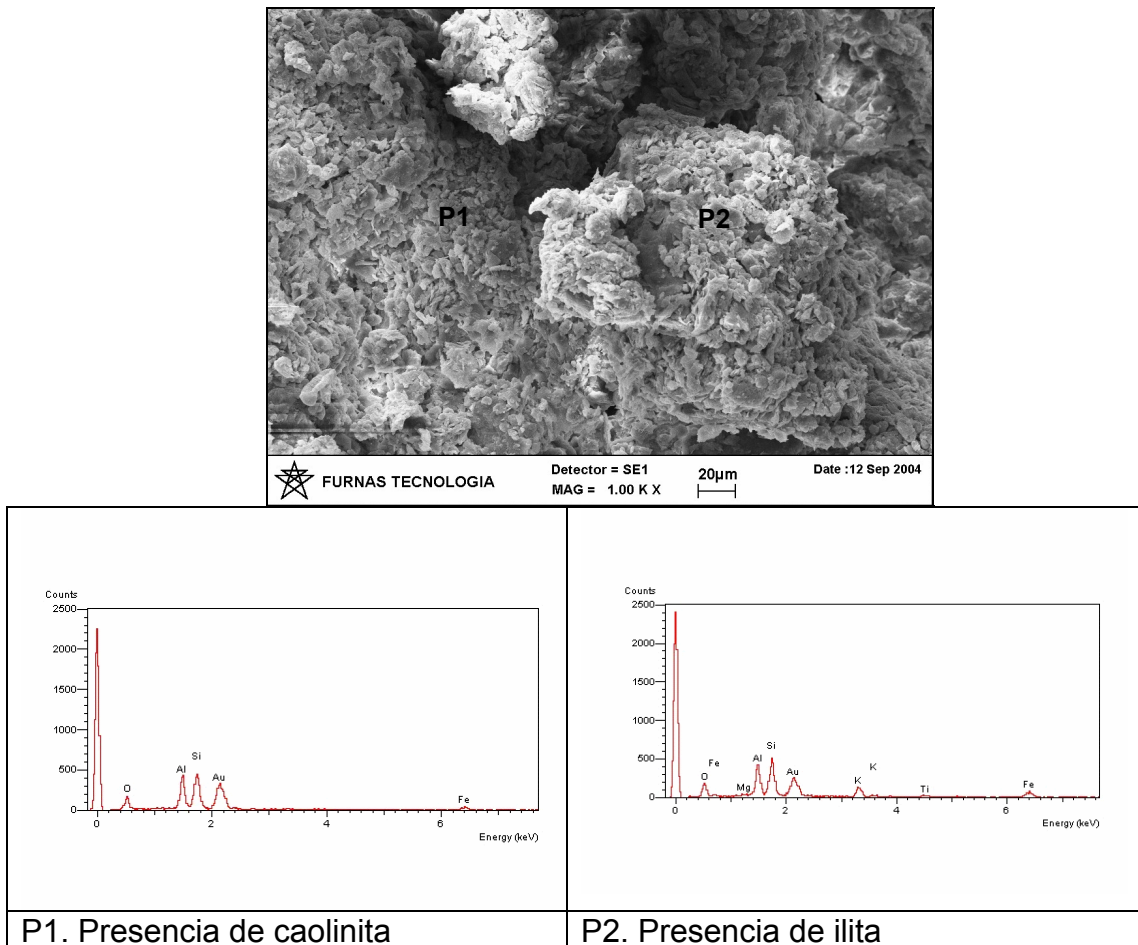
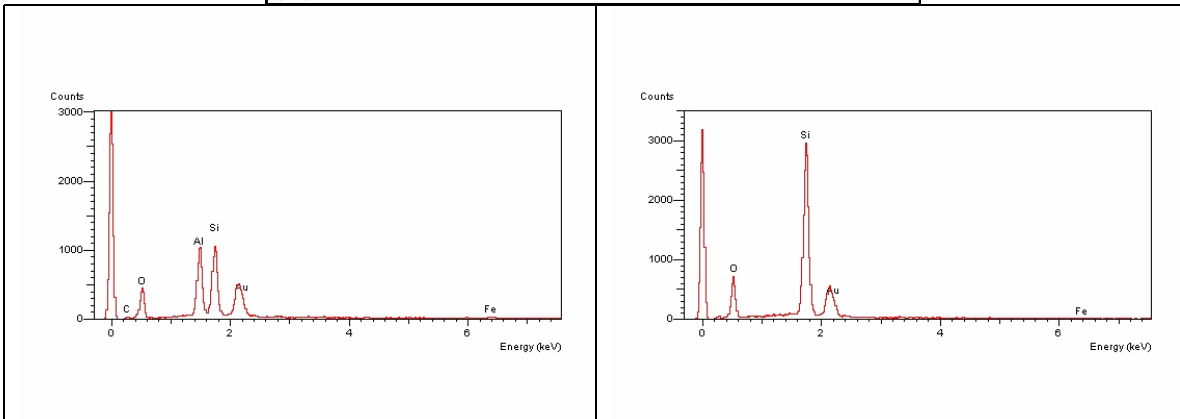
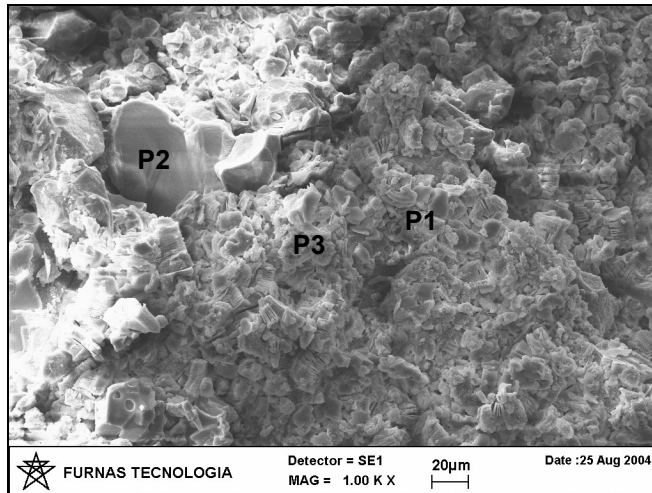
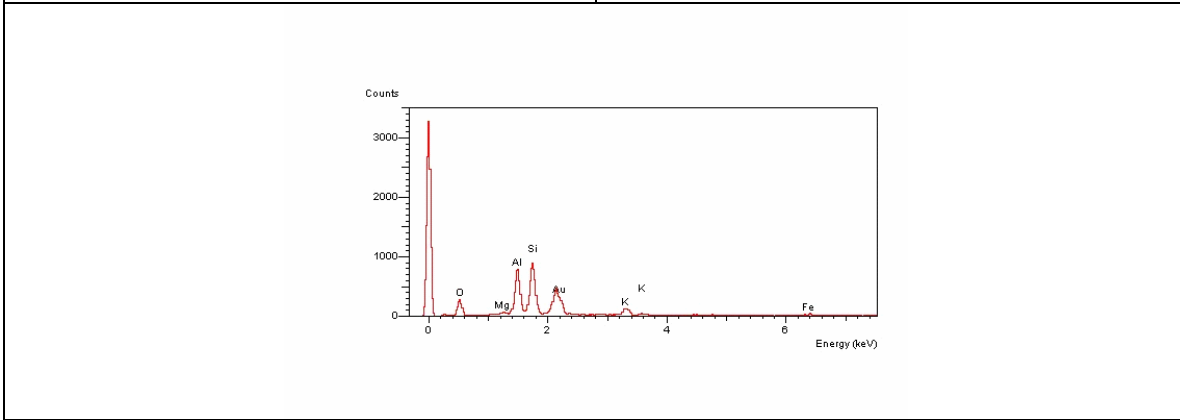


Figura 5.22. Vista general y microanálisis nivel 1 neis de la Iguaná.



P1. Presencia de caolinita.

P2. Presencia de cuarzo



P3. Presencia de illita

Figura 5.23. Vista general y microanálisis nivel 2 neis de la Iguaná.

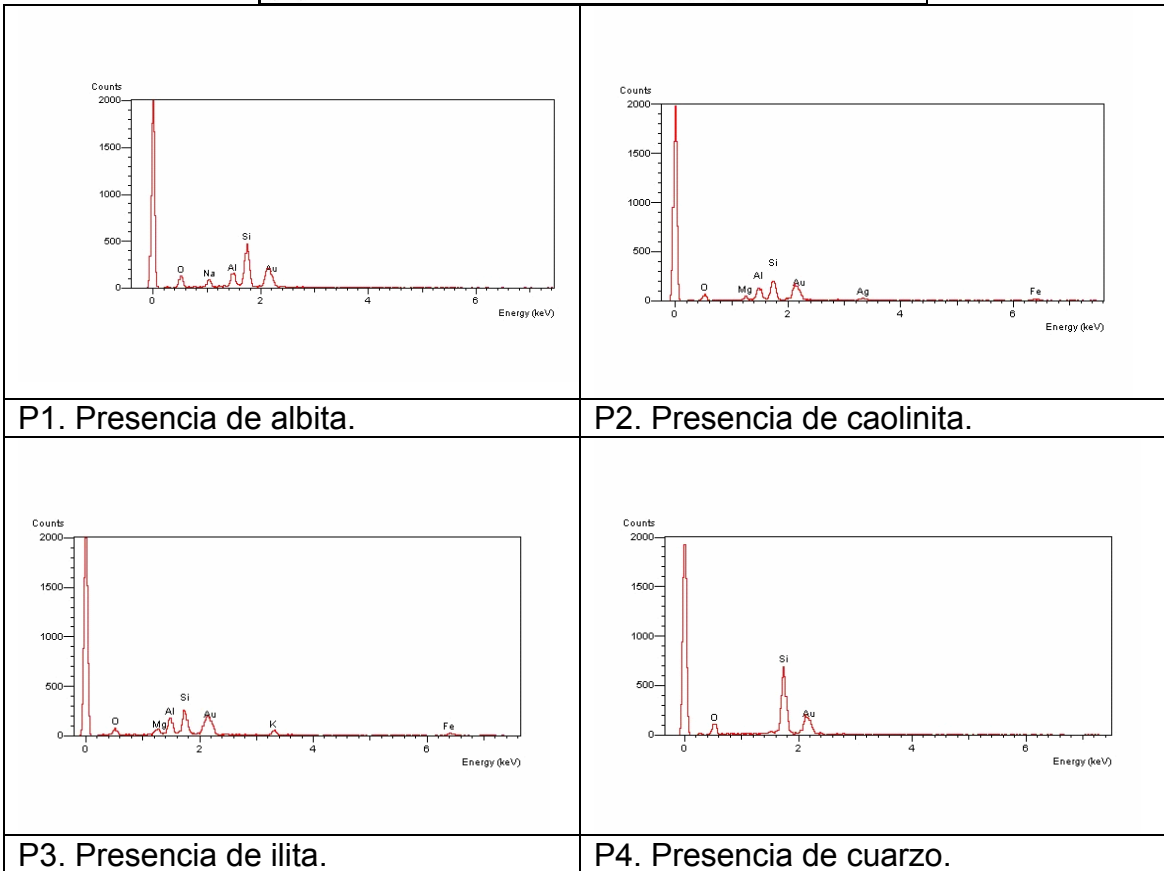
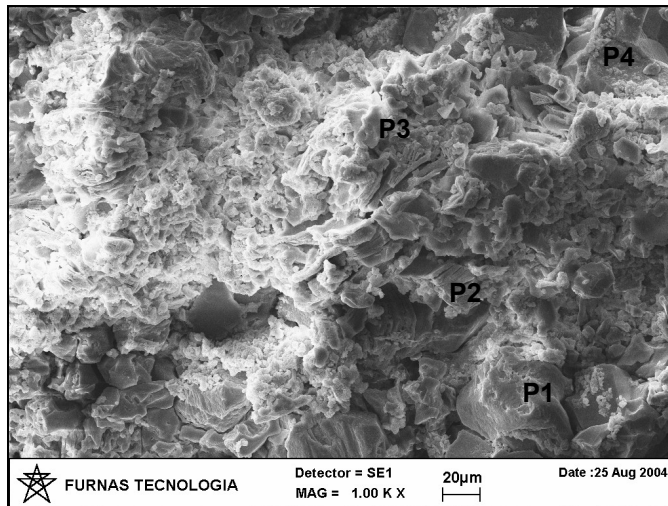
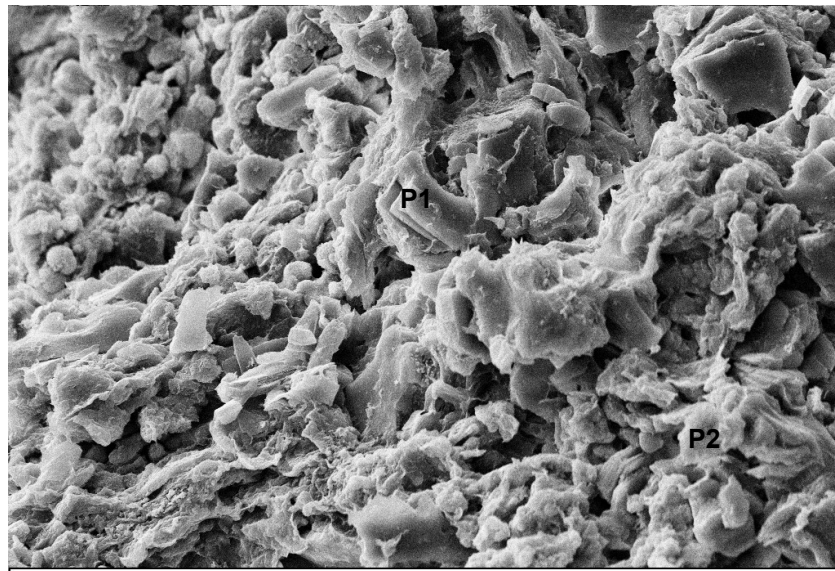
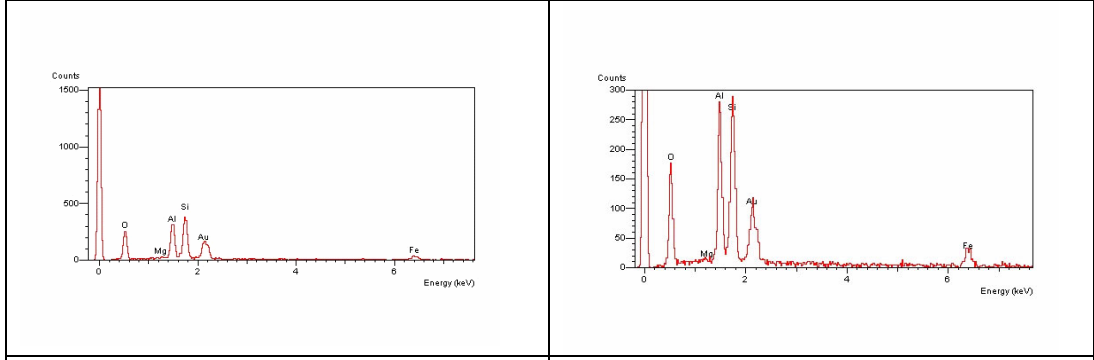


Figura 5.24. Vista general y microanálisis nivel 3 neis de la Iguaná.



FURNAS TECNOLOGIA Detector = SE1 20µm Date : 10 Aug 2004
 MAG = 2.50 K X



P1. Presencia de caolinita. P2. Presencia de caolinita/ilita

Figura 5.25. Vista general y microanálisis nivel 1 anfibolitas de Medellín.

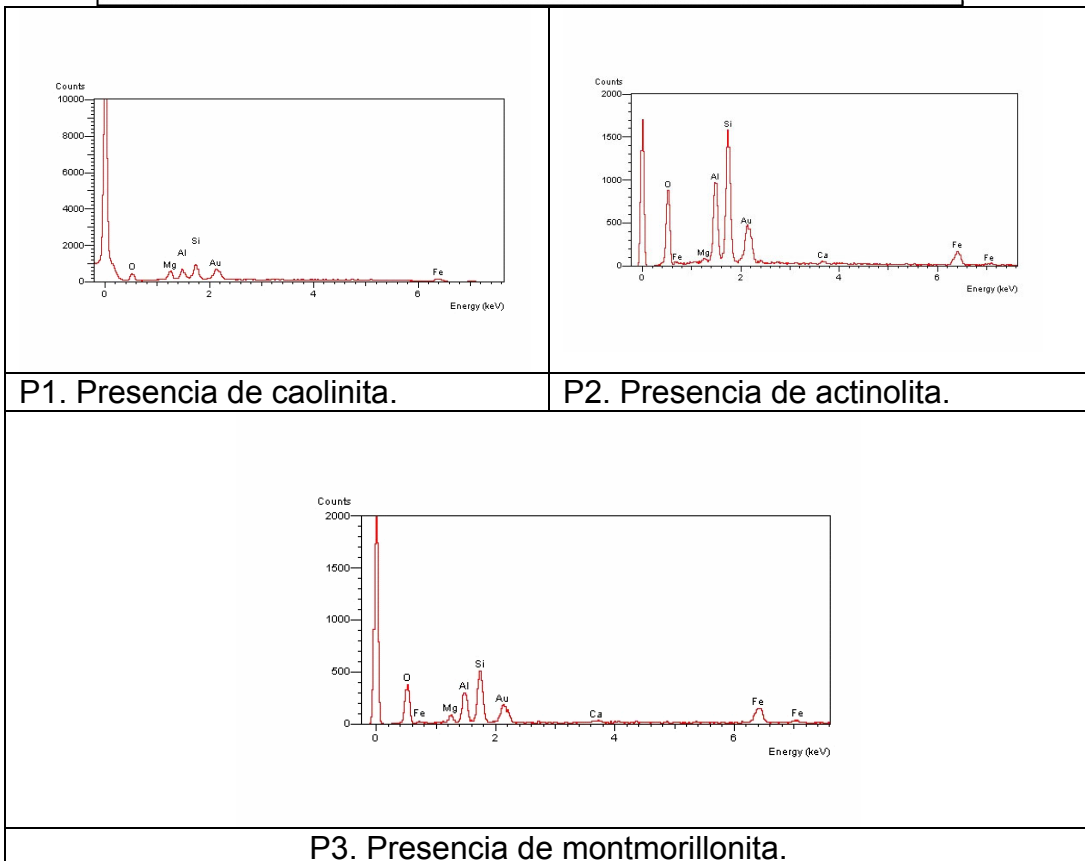
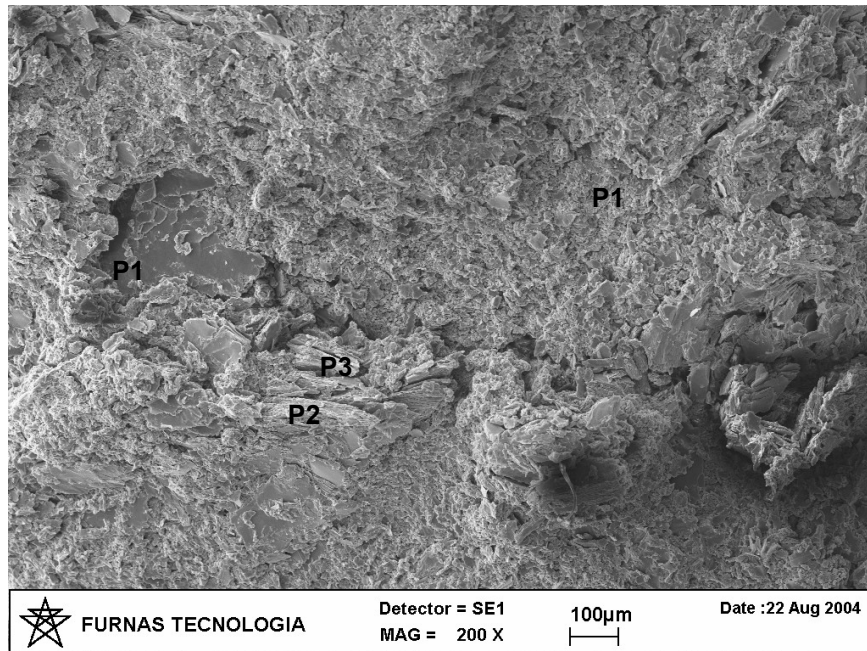


Figura 5.26. Vista general y microanálisis nivel 2 anfibolitas de Medellín.

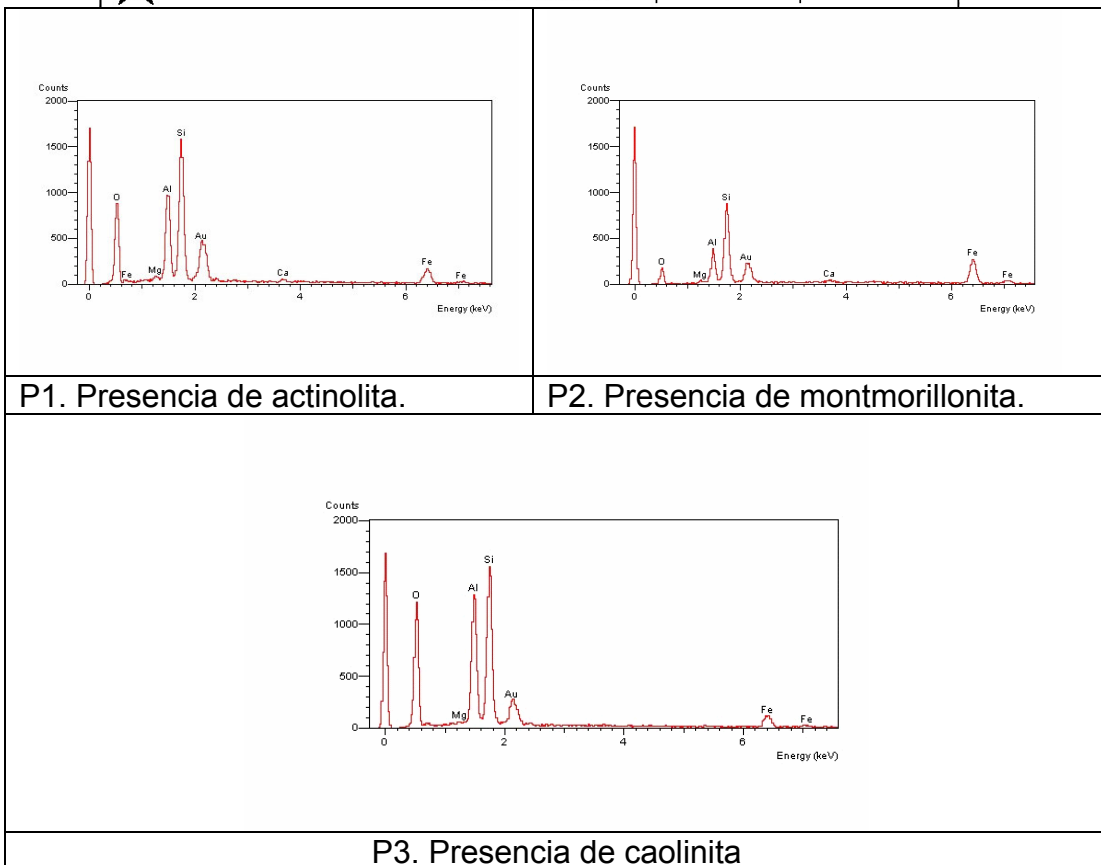
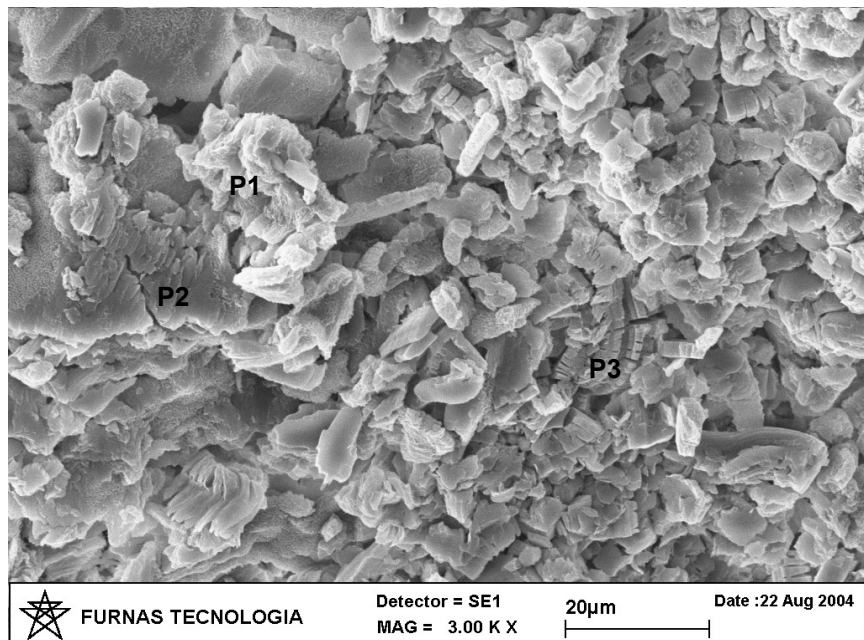


Figura 5.27. Vista general y microanálisis nivel 3 anfibolitas de Medellín.

Un detalle importante a ser observado en estos análisis es la presencia de hierro en prácticamente todos los análisis químicos, lo cual muestra la alteración que sufren los suelos tropicales, esta liberación de hierro es el principal responsable en la generación de agregaciones, el aumento en el índice de vacíos en los suelos

finos y contribuye a una mayor plasticidad en los niveles superficiales (Bueno et al., 2003). Además, se puede observar la presencia de minerales primarios como los feldespatos (microclina y albita) y anfíboles (actinolita) que indican suelos jóvenes, los cuales al aproximarse más a la superficie del terreno, pasan de primarios a secundarios (caolinita, ilita, montmorillonita) por efecto de la meteorización y lixiviación que sufren los niveles superiores.

En la Figura 5.28 y 5.29, se muestra en igual número de aumentos la imagen de cada uno de los niveles de los perfiles en estudio, para analizar los cambios de estructura.

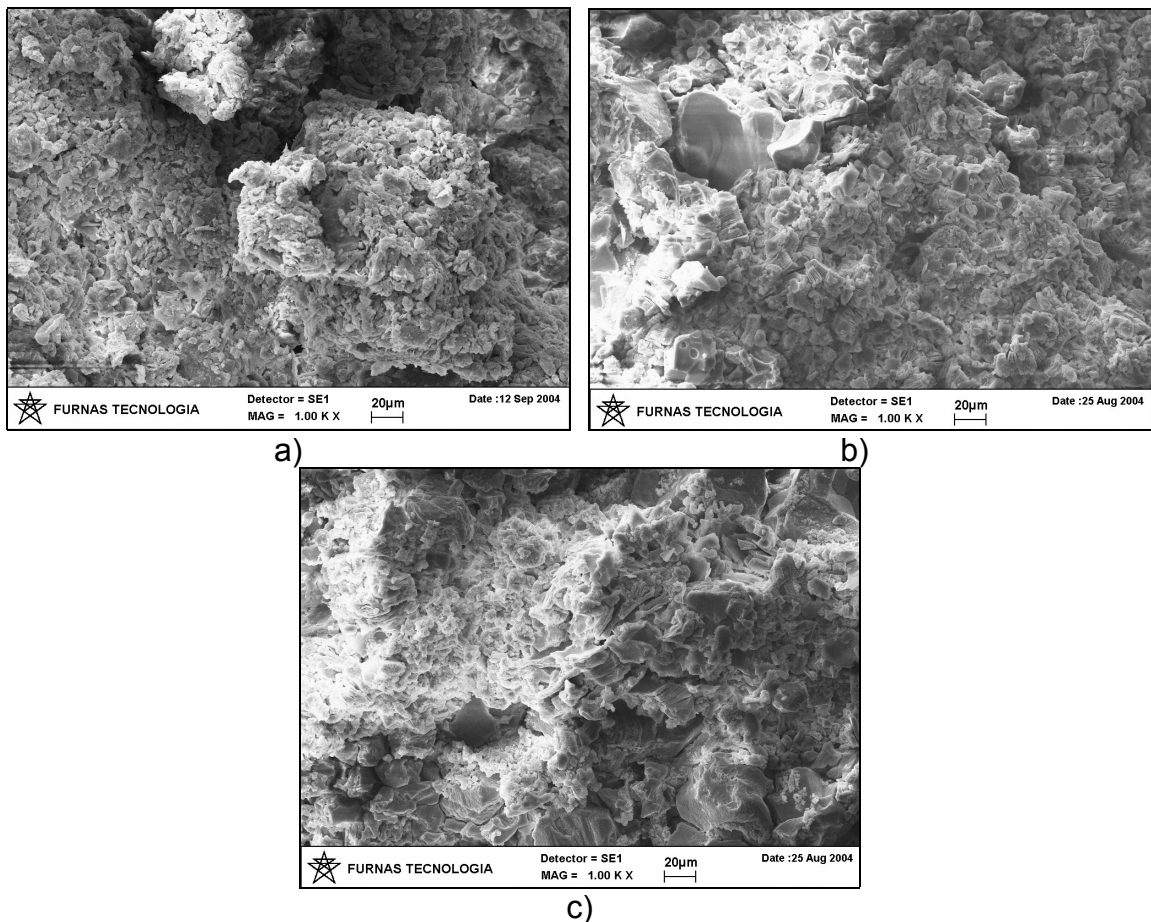


Figura 5.28. a) nivel 1, b) nivel 2 y c) nivel 3 neis de la Iguaná.

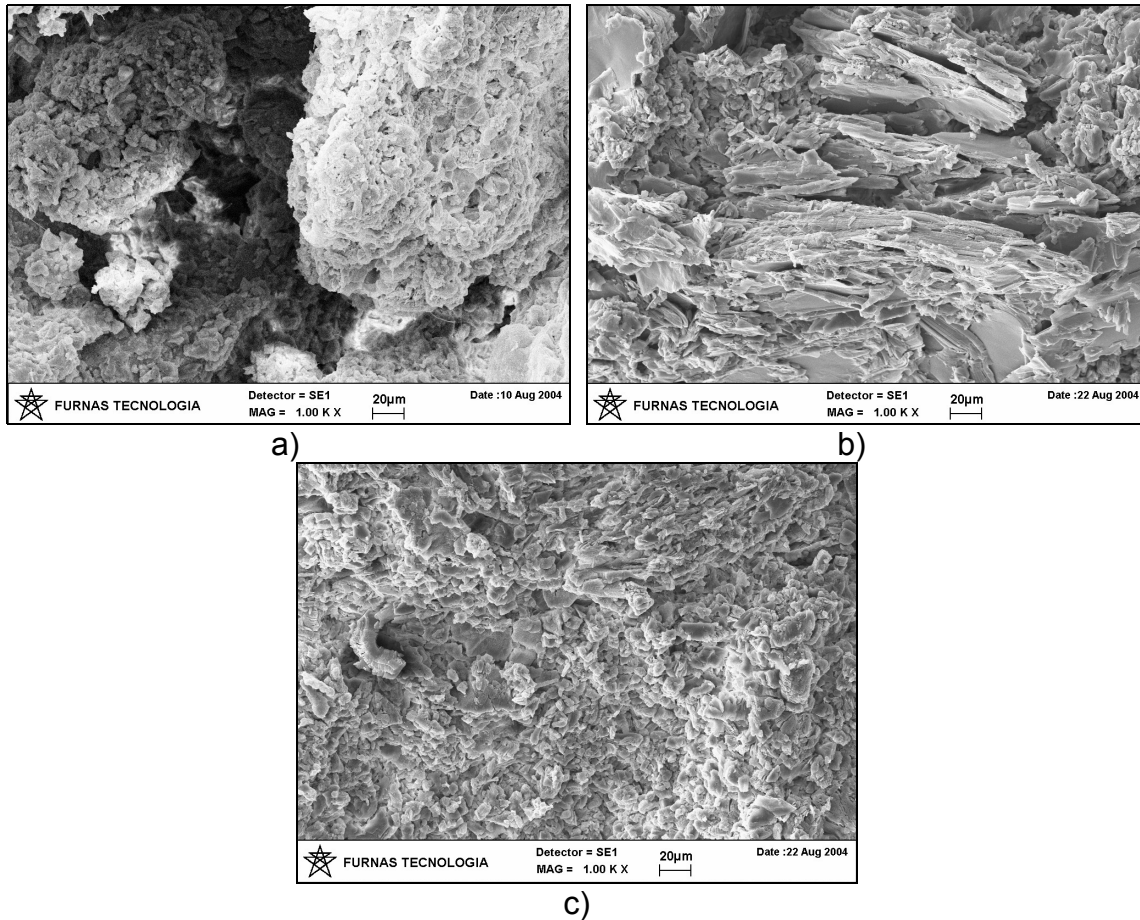


Figura 5.29. a) nivel 1, b) nivel 2 y c) nivel 3 anfibolitas de Medellín

Del perfil correspondiente al neis de la Iguaá (Figura 5.28), se puede apreciar en términos de porosidad y distribución de poros, que para el nivel 1 se presentan poros grandes debido a las agregaciones generadas por las concentraciones de óxidos e hidróxidos de Fe (Bueno et al., 2003)) y a medida que se aumenta en profundidad la estructura se va tornando más homogénea.

Los valores de cohesión obtenidos en la caracterización mecánica, pueden ser mayores a menor profundidad, debido a que hay mayor contenido de minerales de arcillas formados por el proceso de meteorización en los niveles superiores. En cuanto a lo valores de ángulo de fricción, tiene su máximo valor en el nivel 3, por presentar mayores puntos de contacto (estructura homogénea).

Para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín (Figura 5.29), el nivel 1 muestra muchas agregaciones y vacíos, por ello su alta relación de vacíos y su mayor cantidad de finos. El nivel 2, presenta un arreglo más laminar y de líneas definidas. Para el nivel 3, la relación de vacíos es menor, hecho que se observa en los pocos vacíos que deja el empaquetado de los minerales y el no presentar una orientación puede ser la causa de una mayor cohesión de la muestra.

El análisis de las secciones delgadas de las muestras falladas, incluyendo la roca, hecho en el SEM del laboratorio de Microscopía Avanzada de la Universidad Nacional, se muestran de la Figura 5.30 a 5.37.

Para el neis de la Iguaná.

a) Nivel 1:

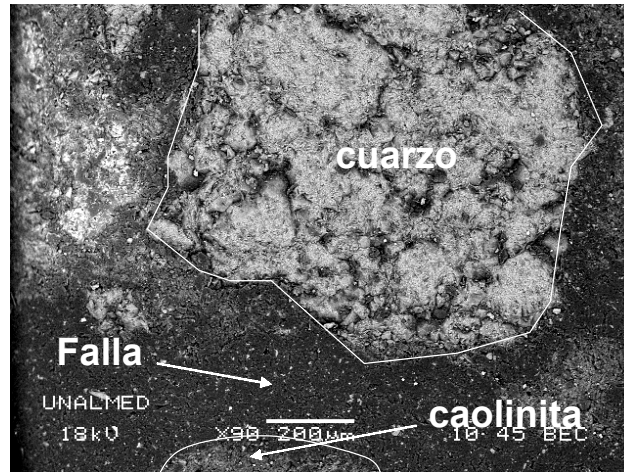


Figura 5.30. Imagen falla neis nivel 1.

Se identificaron como principales minerales el cuarzo y la caolinita. Se puede observar que el cuarzo es el mineral más grueso y controla la formación de la falla.

b) Nivel 2:

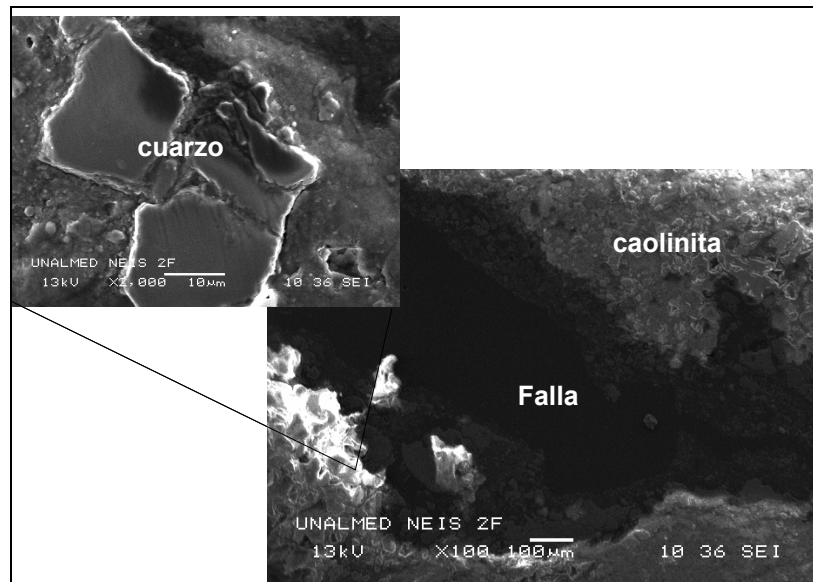


Figura 5.31. Imagen falla neis de la Iguaná nivel 2

Esta muestra es bastante porosa con minerales de caolinita (cementada por óxidos de hierro (Fe) y manganeso (Mn)), cuarzo, feldespatos, ilitas y moscovitas, en este nivel al igual que en el anterior, la falla se presenta entre el contacto del cuarzo y la caolinita (Figura 5.31)

c) Nivel 3:

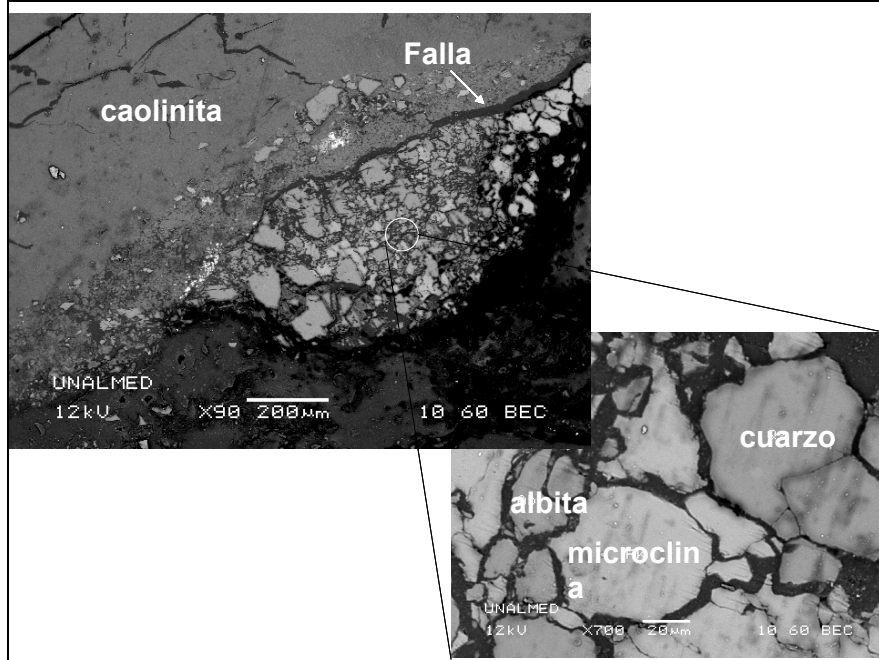


Figura 5.32. Imagen falla neis de la Iguaná nivel 3.

La Figura 5.32, muestra la presencia de albita, microclina y cuarzo. La zona por donde se origina la falla se encuentra rellena con caolinita.

d) Roca:

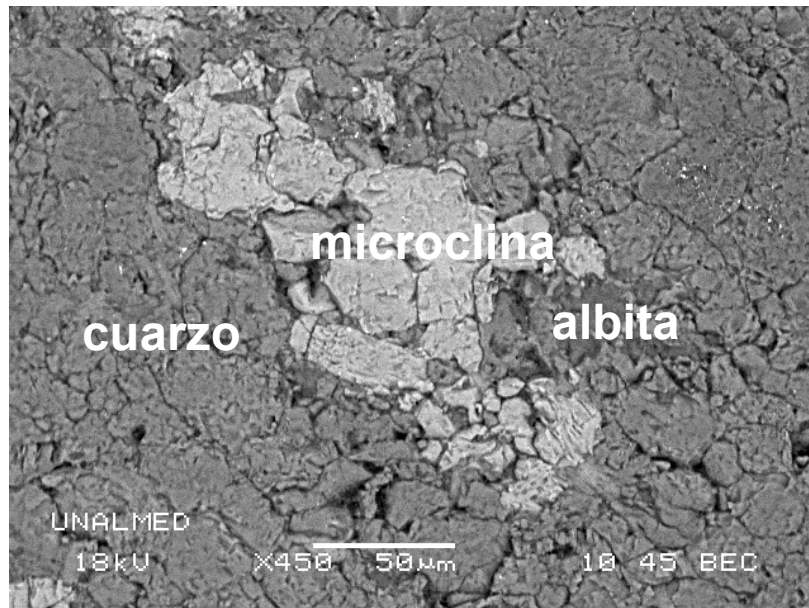


Figura 5.33. Roca neis de la Iguaná.

La roca muestra, tal como se observa en la Figura 5.33, presencia de cuarzo, albita y microclina.

Para las anfibolitas de Medellín:

a) Nivel 1:

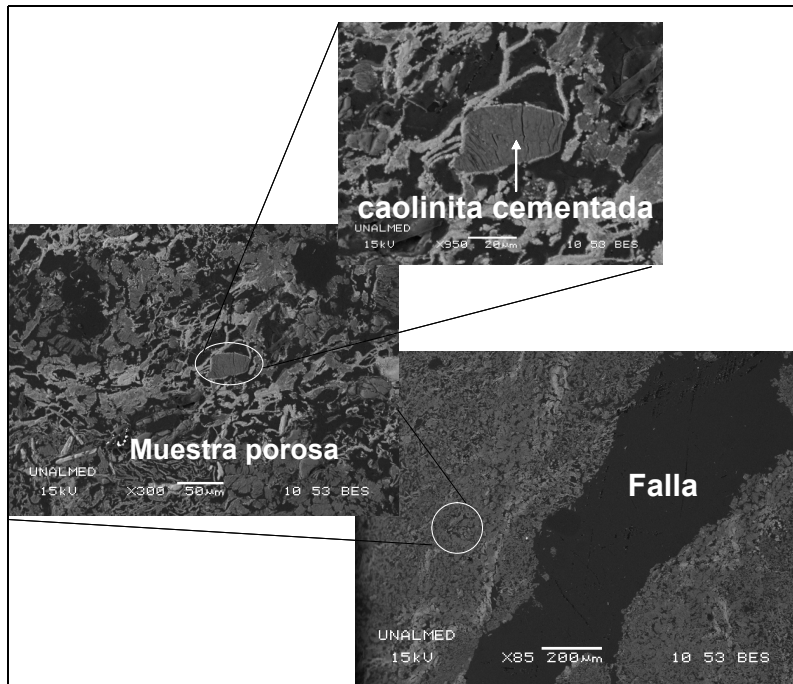


Figura 5.34. Nivel 1 falla anfibolitas de Medellín.

El nivel 1 cuenta con mucha presencia de caolinita cementada por hierro (Fe) y con un poco de calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Anexo 5), tiene también algo de cuarzo e ilita; en esta muestra se presenta mucha porosidad, por lo cual la falla se generó siguiendo los minerales más finos como es la caolinita (Figura 5.34).

b) Nivel 2:

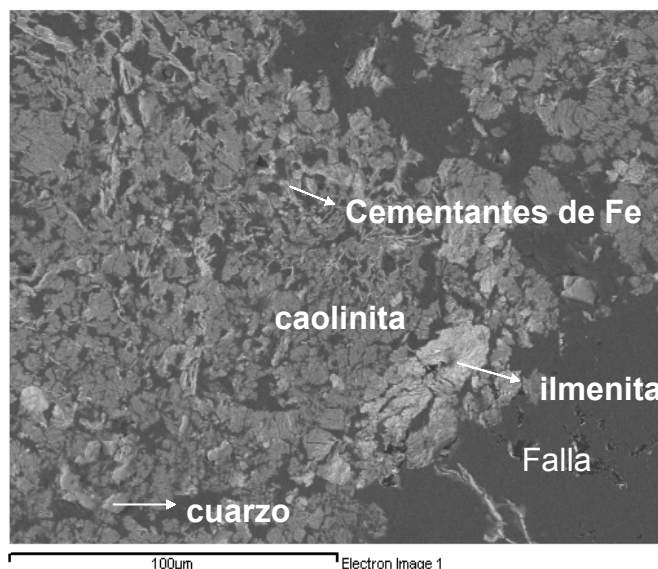


Figura 5.35. Nivel 2 falla anfibolitas de Medellín.

En el nivel 2, la muestra se caracteriza por la presencia de caolinita, montmorillonita, plagioclasas, así como la tremolita y actinolita. Asociado a las plagioclasas, se observó ilmenita, que alterada se degrada en rutilo o anataza. Los feldespatos se caolinitizan y los anfíboles quedan embebidos; al ser fallada la muestra por compresión simple, la falla se da entre la zona de las caolinitas muy alteradas y las menos alteradas (Figura 5.35).

c) Nivel 3:

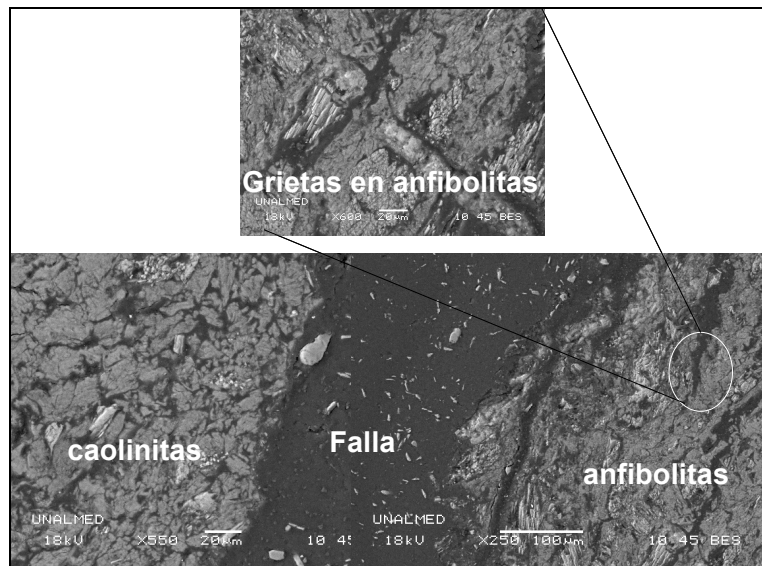


Figura 5.36. Nivel 3 falla anfíbolitas de Medellín.

En este nivel se observaron anfíboles y caolinitas los cuales en su contacto generan la superficie de falla, los anfíboles presentes en la muestra son de contacto débil, ya que se ven agrietados (Figura 5.36).

d) Roca:

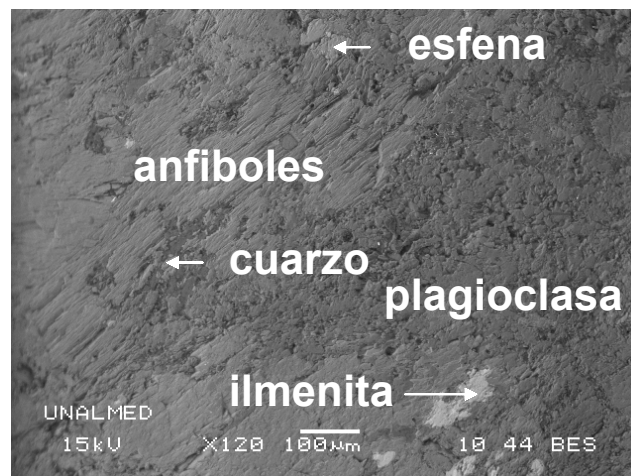


Figura 5.37. Roca anfíbolita de Medellín.

Para el caso de la roca, esta contiene minerales como la esfena, ilmenita, anfíbol (actinolita), plagioclasa y cuarzo.

5.9 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Para la caracterización mecánica de los niveles de cada perfil metamórfico, se ejecutaron ensayos de compresión simple, cizallamiento directo, compresión confinada, determinación de curvas características y el ensayo de tracción indirecta o diametral, cuyos resultados se presentan a continuación.

5.9.1 Compresión simple

La Tabla 5.9 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple, módulo de elasticidad (E) y carga última (qu), asociados con la succión ($u_a - u_w$), calculada por medio del ensayo de succión (ítem 5.9.4). En la Figura 5.38 y 5.39, se puede ver la relación directa entre estos valores tanto para el perfil originado del neis de la Iguaná como para el perfil originado de las anfíbolitas de Medellín.

Tabla 5.9. Resultados ensayo compresión simple.

Nivel	Neis de la Iguaná			Anfíbolitas de Medellín		
	E (kPa)	qu (kPa)	($u_a - u_w$) (kPa)	E (kPa)	qu (kPa)	($u_a - u_w$) (kPa)
1	280	193	4900	22	92	245
2	70	126	1550	14	34	155
3	60	47	1250	34	85	620

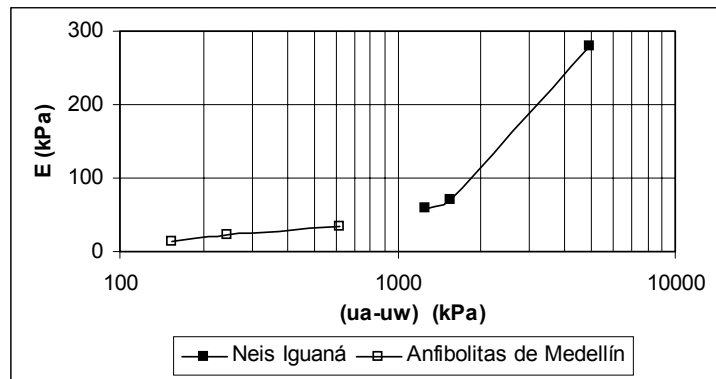


Figura 5.38. Relación entre ($u_a - u_w$) y E de los dos perfiles metamórficos.

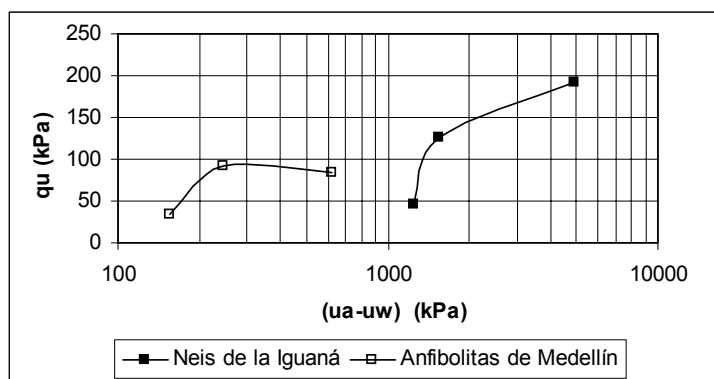


Figura 5.39. Relación entre ($u_a - u_w$) y q_u – de los dos perfiles metamórficos.

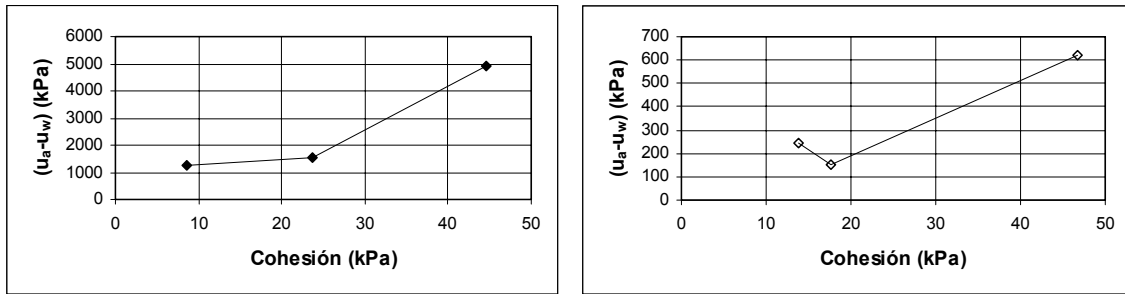
En la Figura 5.38 se puede observar que el módulo de elasticidad no está aparentemente dependiendo del sitio o de la meteorización del mismo, sino de la succión. Con respecto a la carga última, de la Figura 5.39, se ve que se llega a un punto donde no se gana resistencia con la succión, ya que el ángulo de fricción con relación a la succión matricial (ϕ^b) tiende a cero, el fenómeno es más del mineral, por ende tiende a estabilizar. A pesar de que el módulo aparentemente depende de la succión y no está muy asociado al perfil de alteración, el comportamiento de la succión cambia bastante de un perfil a otro.

5.9.2 Cizallamiento directo

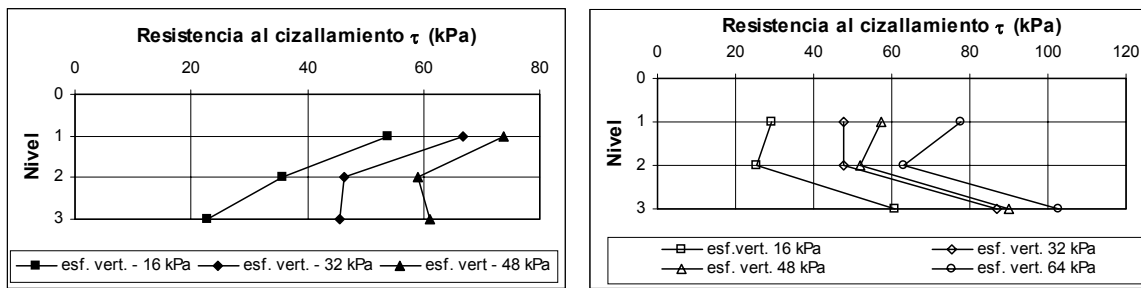
Los resultados de cohesión (c^*), fricción (ϕ) y humedad natural (w_n), del ensayo de cizallamiento directo para los dos perfiles metamórficos se encuentran consignados en la Tabla 5.10. La Figura 5.40 a y b, muestra la variación de la cohesión con respecto a la succión y en la Figura 5.43 se observa como es el cambio de la resistencia al cizallamiento (τ) con la profundidad. El anexo 4 muestra estos resultados calculados con los valores residuales.

Tabla 5.10. Resultados ensayo de cizallamiento directo.

Nivel	neis de la Iguañá				anfibolitas de Medellín			
	c^* (kPa)	ϕ (°)	w_n (%)	($u_a - u_w$) (kPa)	c^* (kPa)	ϕ (°)	w_n (%)	($u_a - u_w$) (kPa)
1	44.68	31.9	12.7	4900	13.87	44	41	245
2	23.75	35	10.5	1550	17.56	41.8	37.7	155
3	8.54	46.4	4.5	1250	46.8	41.2	22	620



a) b)
 Figura 5.40. a) Relación de c^* y succión - Perfil originado del neis de la Iguaná,
 b) Relación de c y succión - Perfil originado de las anfibolitas de Medellín.



a) b)
 Figura 5.41. a) Resistencia al cizallamiento - Perfil originado del neis de la Iguaná,
 b) Resistencia al cizallamiento - Perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

La tendencia general que se ve en la Figura 5.40 es de aumentar la cohesión con el aumento de la succión. De la Figura 5.41 a y b, se observa que para los niveles superficiales a medida que disminuye la humedad, disminuye la resistencia al cizallamiento, indicando aporte por los cementantes y para los niveles inferiores la succión tiene mayor efecto, aumentando la resistencia al cizallamiento.

Los valores de c^* (kPa) obtenidos, le dan fuerza al hecho de que hay presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, que actúan como cementantes contribuyendo al procesos de formación de concreciones lateríticas (Camapum, 2004). Los altos resultados de ángulo de fricción (ϕ) se deben a el arreglo microestructural.

5.9.3 Compresión confinada

El comportamiento esfuerzo-deformación ante cargas compresivas de los suelos en estudio se presentan en la Tabla 5.11 y la Figura 5.42

Tabla 5.11. Resultados ensayos consolidación.

neis de la Iguaná				
Nivel	a_v (cm ² /Kg)	m_v (cm ² /Kg)	Cc	e_o
1	0.02	0.009	0.22	1.16
3	0.01	0.008	0.18	0.75
anfibolitas de Medellín				
Nivel	a_v (cm ² /Kg)	m_v (cm ² /Kg)	Cc	e_o
1	0.088	0.03	1.02	1.92
3	0.028	0.013	0.4	1.23

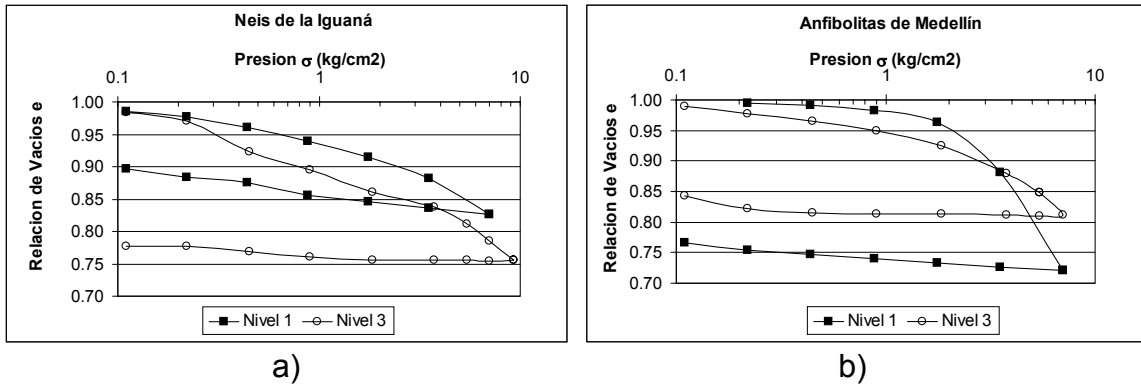


Figura 5.42. a) Curva presión – relación de vacíos (normalizada) para el perfil originado del neis de la Iguaná, b) Curva presión – relación de vacíos (normalizada) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

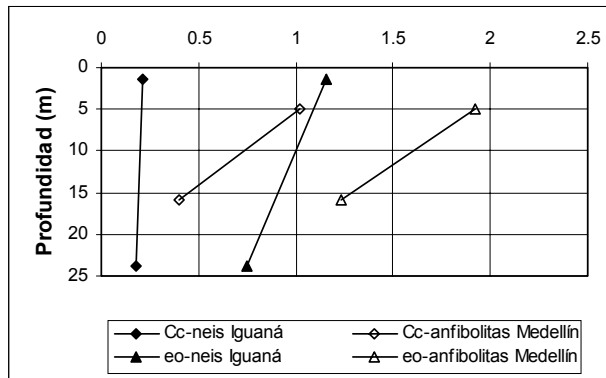


Figura 5.43. Índice de compresión (Cc) y Relación de vacíos inicial (e_o) para los dos perfiles metamórficos.

De la Tabla 5.11, se observa que los valores de índice de compresión (Cc), para el neis de la Iguaná en el nivel superior, tiene una compresibilidad de moderada a media y para el nivel 3 su compresibilidad va de ligera a baja; en el caso de las anfibolitas de Medellín, el nivel superficial, presenta una alta compresibilidad, para el nivel 3 pasa a ser moderada o media (Márquez, 1982). Además, el índice de compresión (Cc) para las anfibolitas de Medellín es mayor que para el neis de la Iguaná (Figura 5.42), hecho igualmente reflejado en los análisis por SEM, donde se vio que el perfil de las anfibolitas es más poroso al pasar del nivel 1 al 3, que el

neis de la Iguaná. Entonces, para ambos perfiles el índice de compresión (C_c), el coeficiente de compresibilidad (a_v), el coeficiente de compresibilidad volumétrico (m_v), aumentan a medida que se acerca más a la superficie, hecho asociado con la relación de vacíos; donde, como se ve en la Figura 5.43, la pendiente de la recta de C_c y la pendiente de la recta de e_o son similares, o sea que grandes cambios de volumen se presentan en muestras con mayores relaciones de vacíos.

En cuanto a los gráficos de presión - relación de vacíos, según Vargas (1973), un suelo de estructura cementada presenta esfuerzos de cedencia similares a los que se presentan en un suelo sedimentario preconsolidado y luego se presenta la destrucción de la cementación (Figura 5.44). Este efecto se observa claramente en el nivel superior de las anfibolitas de Medellín, para los otros niveles la relación de vacíos disminuye con la presión suavemente, por lo que la destrucción de los cementantes se da progresivamente (Figura 5.42).

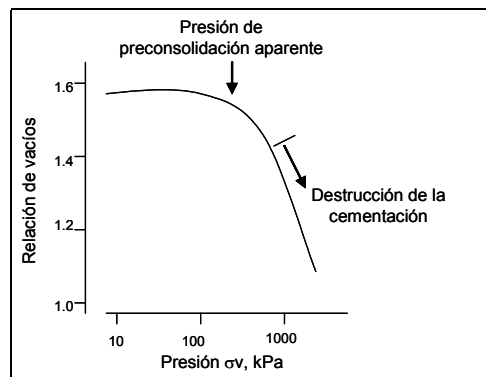


Figura 5.44. Presión aparente de consolidación (Fookes, 2004. Tomado de Vargas, 1973).

En cuanto a la colapsibilidad de estos suelos según Gibbs & Bara (1962), citados por Camapum (2004), un suelo puede presentarse en alguno de los siguientes tres casos, según la Figura 5.45:

Caso I: Potencial alto de colapso

Caso II: Poca resistencia a la deformación

Caso III: Colapso verificado solamente con la aplicación de una sobre carga

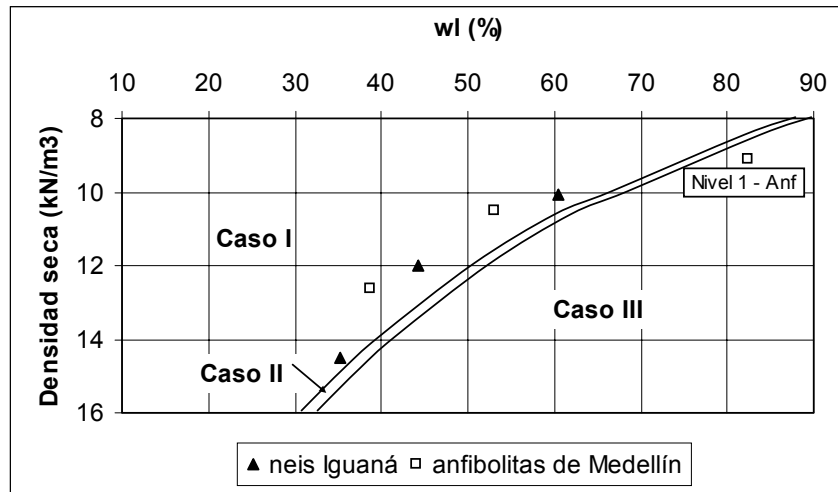


Figura 5.45. Identificación de suelos colapsibles en las dos formaciones según Gibbs & Bara (1962), citado por Camapum (2004).

Según este criterio de identificación, los diferentes niveles de cada perfil presentan un potencial alto al colapso, a excepción del nivel 1 de las anfibolitas de Medellín, en el cual el colapso solo será verificado con una aplicación de sobre carga. Esta característica está coincidiendo con lo analizado en la Figura 5.5 que relaciona e_o con e_i , donde el nivel 1 no presentó tendencia a fluir. Aunque sería ideal confirmar la colapsibilidad de estos suelos con otros ensayos adicionales, como la compresión confinada saturada, para compararla con la no saturada.

5.9.4 Curvas características

Las Figuras 5.46 y 5.47 muestran las curvas características en función de la humedad (w) y la saturación (S_r) respectivamente, para el perfil originado del neis de la Iguaná.

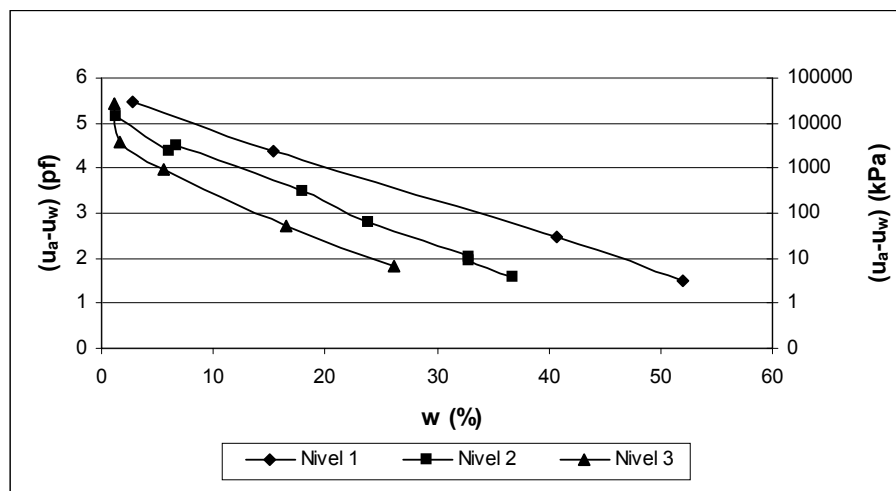


Figura 5.46. Curva característica en función de la humedad (w) para el perfil originado del neis de la Iguaná.

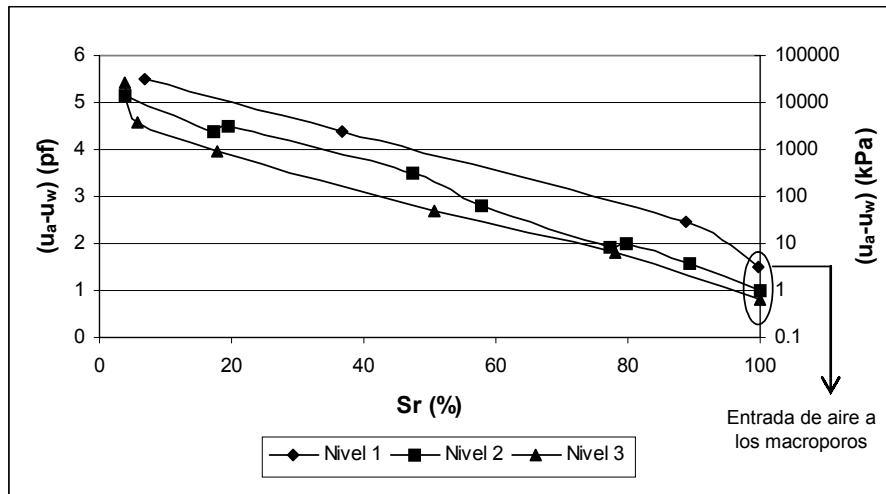


Figura 5.47. Curva característica en función de la saturación (S_r) para el perfil originado del neis de la Iguaná.

De la Figura 5.46 se puede observar, que el nivel 1 presenta succiones mayores que el nivel 2 y el nivel 2 mayores succiones que el nivel 3, lo cual está confirmando la meteorización que se ha observado para este perfil. En la Figura 5.47, se ve que la entrada de aire a los macroporos se encuentra entre 0.7 y 3.2 kPa. En estas curvas no se observa un sistema bimodal, debido a que se está teniendo una disminución uniforme de poros y por ende de la succión con el contenido de humedad y el grado de saturación, tal como se obtuvo en el porosímetro de mercurio.

En las Figuras 5.48 y 5.49 al igual que para el perfil originado del neis de la Iguaná, se presentan las curvas características para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín, en función de la humedad (w) y la saturación (S_r).

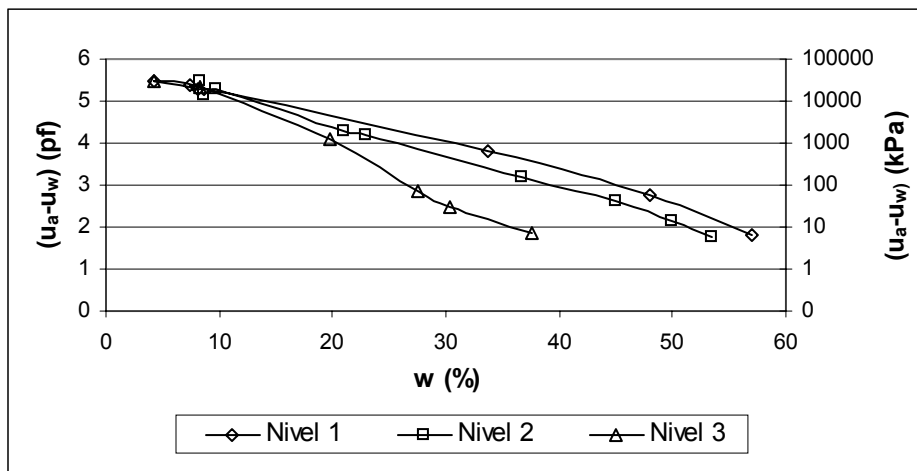


Figura 5.48. Curva característica en función de la humedad (w) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

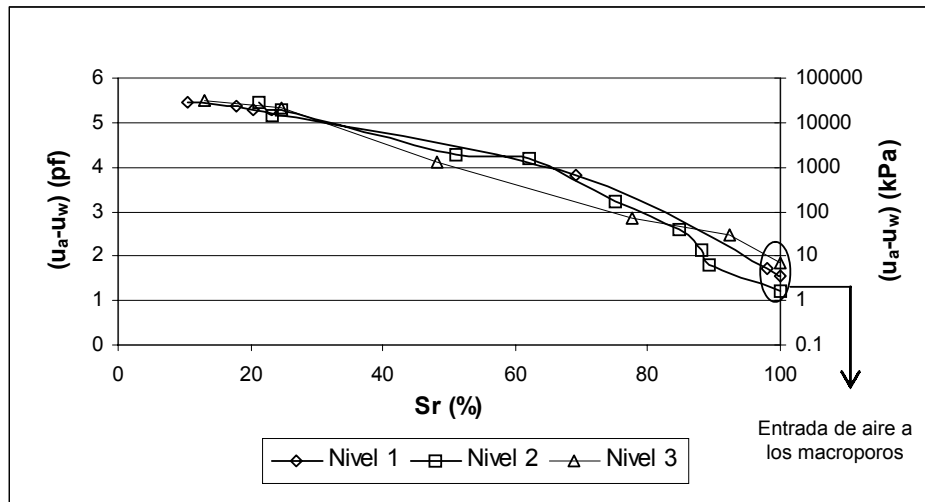


Figura 5.49. Curva característica en función de la saturación (S_r) para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

En la Figura 5.48, se observa que las succiones entre el nivel 1 y 2 son bastante próximas, pero al igual que para el perfil del neis de la Iguañá, este perfil muestra una secuencia de meteorización desde el nivel 1 hasta el nivel 3, resultado coincidente con las curvas calculadas por Corrales y Leoz (1996), en los primeros metros del perfil del Volador. De la Figura 5.49, se ve que los niveles son bastante semejantes cuando son analizados en función del grado de saturación, con entrada de aire a los macroporos entre 1.2 y 7.1 kPa.

La Figura 5.50 presenta las curvas de los dos perfiles de meteorización en función de la humedad, donde se observa que las curvas de succión para el perfil originado de las anfibolitas de Medellín siempre están por encima de las curvas de succión del neis de la Iguañá, analizando nivel por nivel, lo cual indica una mayor meteorización para las anfibolitas de Medellín que para el neis de la Iguañá, tal como se vio en las curvas granulométricas, donde el perfil originado de las anfibolitas tenía un poco más de proporción de partículas finas, adicionalmente presenta mayor relación de vacíos y mayor plasticidad.

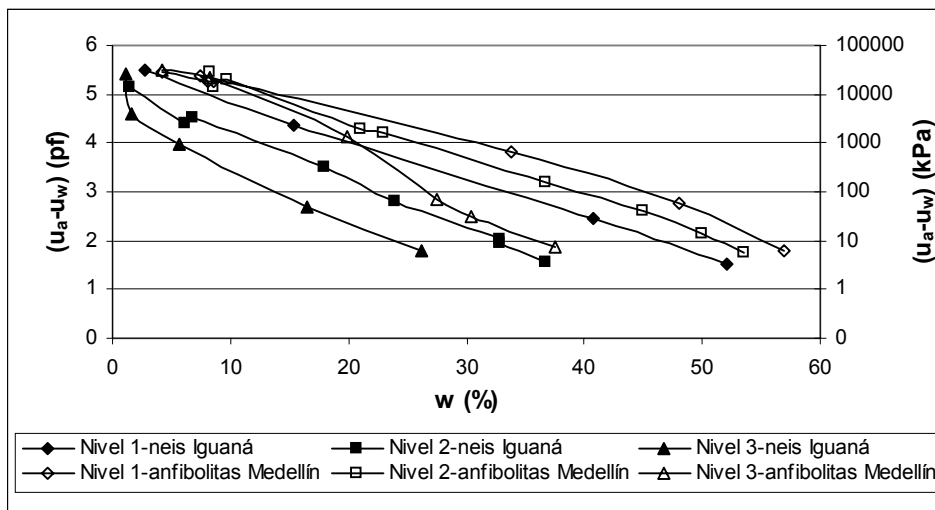


Figura 5.50. Curvas características en función de la humedad (w) para los perfiles metamórficos.

5.9.5 Ensayo de tracción indirecta o diametral

La Figura 5.51 y 5.52, muestran la relación existente entre la tracción indirecta (σ_t) de un suelo con la succión matricial y la humedad ($w\%$), para ambos perfiles metamórficos.

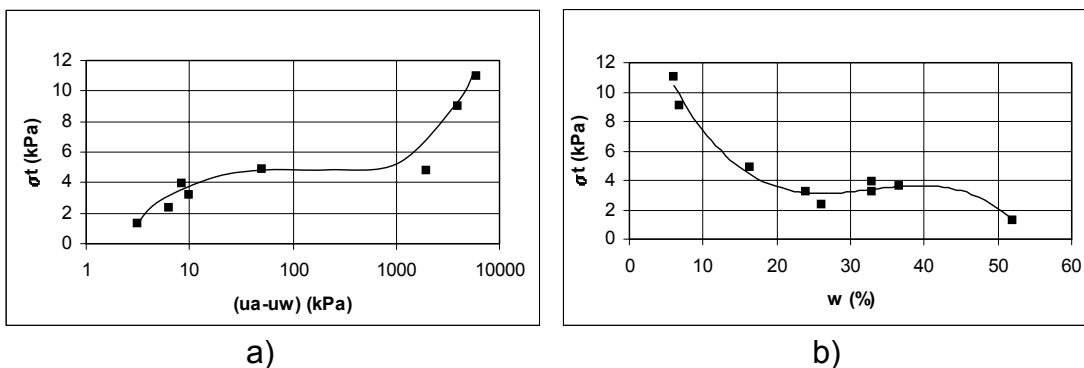


Figura 5.51. a) $(u_a-u_w) - \sigma_t$, b) $w (\%) - \sigma_t$ – Perfil originado del neis de la Iguaná.

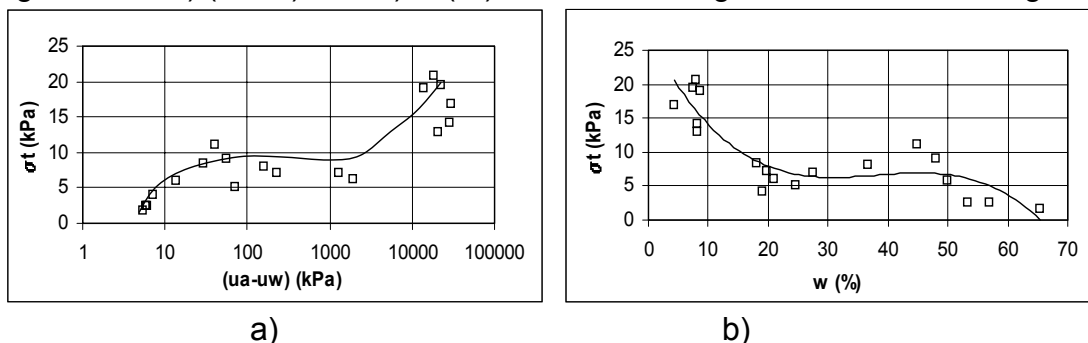


Figura 5.52. a) $(u_a-u_w) - \sigma_t$, b) $w (\%) - \sigma_t$ – Perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

En las Figuras 5.51 y 5.52 se ve una tendencia clara de aumento de tracción diametral con la succión y con la reducción del contenido de humedad.

La Figura 5.53 presenta los valores de cohesión aparente (c), estimados a partir de los datos arrojados por el ensayo de tracción diametral, asociados con la succión matricial ($u_a - u_w$) para ambos perfiles metamórficos.

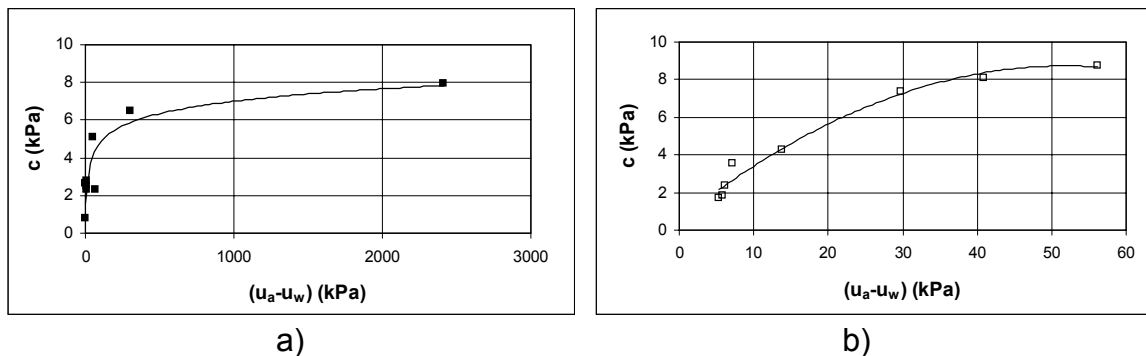


Figura 5.53. a) $(u_a - u_w) - c$ – Perfil originado del neis de la Iguaçu, b) $(u_a - u_w) - c$ – Perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

A partir de estos datos de cohesión se determinó el ángulo de fricción con relación a la succión matricial (ϕ^b) tal como se muestra en las Figuras 5.54 y 5.55 para los dos perfiles.

La relación entre la cohesión aparente y la succión matricial llega a un punto en que se hace estable y no se gana más resistencia al aumentar la succión, ya que para al aumentar la succión, la humedad se pierde y por tanto se tiene menos agua, menos menisco y menos cohesión aparente (Figura 5.55) y el ángulo de fricción con relación a la succión matricial (ϕ^b) tiende a cero (Figura 5.56 y 5.57).

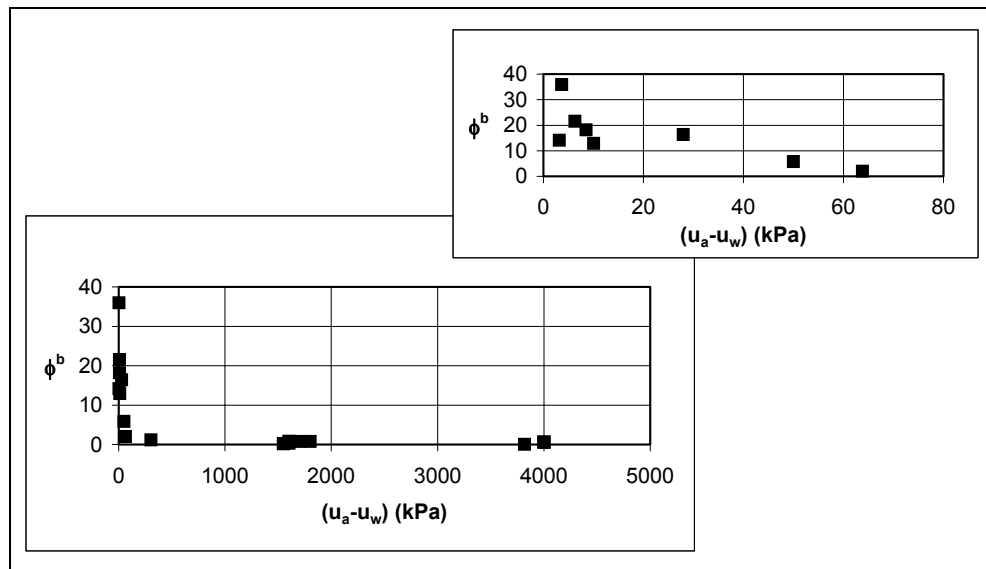


Figura 5.54. $(u_a - u_w) - \phi^b$ – Perfil originado del neis de la Iguaçu.

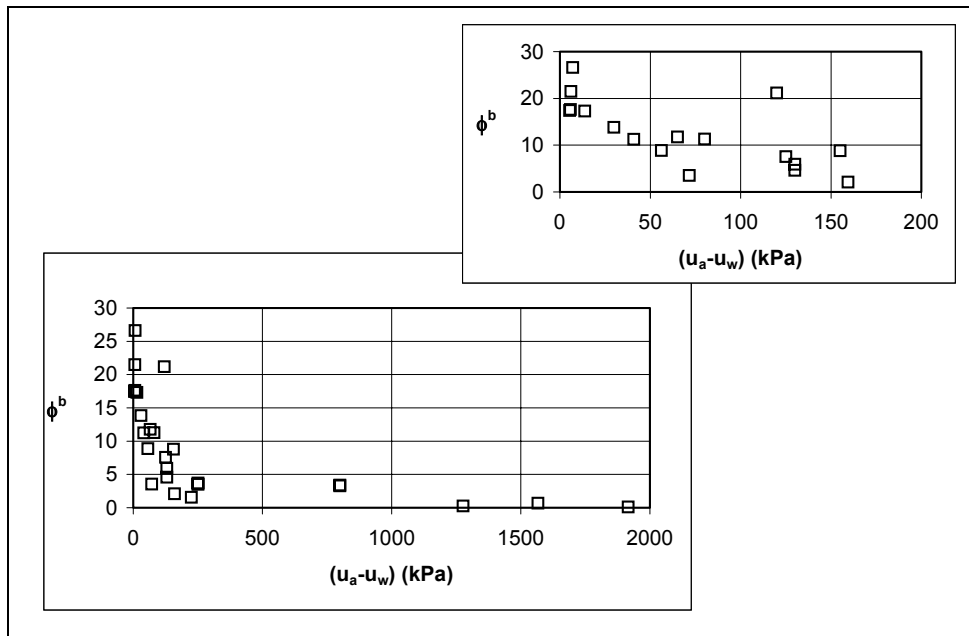


Figura 5.55. $(u_a - u_w) - \phi^b$ – Perfil originado de las anfibolitas de Medellín.

Un aporte de la presente investigación, es la forma de obtener el valor de la cohesión aparente (c) y el ϕ^b , a partir del ensayo de tracción; sin embargo, esta técnica se debe refinar en aspectos tales como el definir la geometría más adecuada para los cuerpos de prueba.

5.10 CARACTERIZACIÓN FINAL DE LOS PERFILES

En la Tabla 5.12, se presenta el resumen de la clasificación física, química, mineralógica, microestructural y mecánica de los dos perfiles de origen metamórfico estudiados.

Tabla 5.12 Clasificación física, química, mineralógica, microestructural y mecánica de los dos perfiles metamórficos.

Variable	Neis de la Iguaná			Anfibolitas de Medellín		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
G_s	2.66	2.63	2.63	2.82	2.88	2.79
w_n (%)	12.7	10.5	4.5	41	37.7	22.0
w_l (%)	60.4	44.2	35.2	82.5	53.17	38.8
l_p (%)	15.2	3.1	0.0	23.7	11.8	6.7
e_o	1.39	1.16	0.78	2.04	1.7	1.17
e_l	1.58	1.14	0.91	2.29	1.5	1.06
n (%)	58	54	44	67	63	54
% pasa N° 200	88	70	59.13	98.1	71.89	68.12
Clasificación Norma BS5930	VI	VI	VI	VI	VI	VI
Clasificación Brand	RS	RS	RS	RS	RS	RS
Clasificación U.S.C	MH	ML	ML	MH	MH	ML
Clasificación MCT	NS'-NG'	NS'	NS'-NA'	NG'	NS'-NG'	NS'
ΔpH	-1.6	-1.6	-1.5	-1.4	-2.0	-2.4
C.I.C	11.79	4.87	5.92	6.36	18.57	16.58
% Al	75	21	2	52	2	1
% B	11	55	75	21	88	89
Actividad	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Normal
Minerales	cuarzo, albita, moscovita, caolinita, illita, óxidos e hidróxidos de Fe, Mn	cuarzo, albita, moscovita, caolinita, illita, óxidos e hidróxidos de Fe, Mn	cuarzo, albita, moscovita, microclina, epidota, caolinita, illita, óxidos e hidróxidos de Fe, Mn	cuarzo, anortita, actinolita, clinocloro, caolinita, óxidos e hidróxidos de Fe	cuarzo, anortita, actinolita, clinocloro, caolinita, montmorillonita, óxidos e hidróxidos de Fe	cuarzo, anortita, actinolita, hornblenda, caolinita, montmorillonita, óxidos e hidróxidos de Fe
Microestructura	Agregaciones	Menos agregaciones, Mas homogénea	Estructura homogénea	Muchas agregaciones y muy porosa	Arreglo laminar	Estructura homogénea
I.A.	4.4	1.5	0.1	1.7	1.4	0.4
q_u (kPa)	193	126	47	92	34	85
E (kPa)	280	70	60	22	14	34
c^* (kPa)	44.68	23.75	8.54	13.87	17.56	46.8
ϕ (°)	31.9	35	46.4	44	41.8	41.2
a_v (cm ² /Kg)	0.02		0.01	0.088		0.028
m_v (cm ² /Kg)	0.009		0.008	0.03		0.013
C_c	0.22		0.18	1.02		0.4
Colapsibilidad	Potencial alto	Potencial alto	Potencial alto	verificado con aplicación de sobre carga	Potencial alto	Potencial alto
Δc (kPa)	0.5	5	44	12	16	21

Donde:

G_s = Gravedad específica

w_n (%) = Humedad natural

w_l (%) = Límite líquido

I_p (%) = Índice de plasticidad

e_o = Relación de vacíos inicial

e_l = Relación de vacíos en el límite líquido

n (%) = porosidad

% pasa N° 200 = porcentaje de partículas que pasan el tamiz N° 200

$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{agua}$

C.I.C = Capacidad de Intercambio Catiónico

% Al = % de saturación de aluminio

% B = % de saturación de bases

I.A. = Índice de Alteración

q_u (kPa) = Carga última por ensayo de compresión simple

E (kPa) = Módulo de elasticidad por ensayo de compresión simple

c^* (kPa) = cohesión total por cizallamiento directo

ϕ (°) = Ángulo de fricción por cizallamiento directo

a_v (cm²/Kg) = Coeficiente de compresibilidad

m_v (cm²/Kg) = Coeficiente de compresibilidad volumétrico

C_c = Índice de compresión

Δc = Incremento en la cohesión para un valor de succión

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- La acción de la meteorización en los perfiles estudiados, está generando hacia la superficie minerales de caolinita y óxidos de hierro, que se presentan en agregaciones, formando una estructura de poros muy grandes, que hace más compresible, más deformable y con menor resistencia por efecto de la succión a estos suelos superficiales. Igualmente, por medio del Índice de alteración, se puede ver, que a mayor índice de alteración (4.4 para el nivel 1, 1.5 para el nivel 2 y 0.1 para el nivel 3 en el neis y 1.7 para el nivel 1, 1.4 para el nivel 2 y 0.4 para el nivel 3 de las anfibolitas), el comportamiento de los suelos en la superficie está afectado por los cementantes y en los menos alterados, cercanos a la roca, la succión es la que tiene un mayor efecto, crece desde 0.5 kPa en el nivel 1 hasta 44 kPa en el nivel 3 del neis de la Iguaçu y desde 12 kPa hasta 21 kPa para las anfibolitas de Medellín (Ver Tabla 5.11). Estos resultados muestran entonces, la importancia de asociar el comportamiento mecánico de los suelos tropicales con sus propiedades físico-químicas, su composición mineralógica y su microestructura.
- Los ensayos para determinar cada una de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas, evidencian el avance de la meteorización en un perfil. En los niveles más cercanos a la roca se tienen partículas de mayor tamaño con alta cantidad de cuarzo o anfíboles y a medida que se acerca más a la superficie aumenta la cantidad de partículas finas con agregaciones, fundamentalmente caolinitas, illitas y montmorillonitas, dándose una alteración de los minerales primarios a secundarios. Igualmente, en términos de porosidad y estructura, al acercarse a la superficie se pasa de tener una estructura más homogénea a una estructura con gran cantidad de poros (por agregaciones), lo cual es de común ocurrencia en regiones tropicales, donde se generan condiciones favorables de drenaje para la lixiviación; todo esto, acompañado de la influencia de las propiedades químicas como es el aumento de la saturación de aluminio (%Al) y el ΔpH y la reducción de la saturación de bases (%B), la C.I.C., el porcentaje de arcillas y la liberación de hierro, que contribuyen al aumento de las propiedades de plasticidad en los niveles superficiales (Ver Tabla 5.11).

- Con los ensayos de caracterización realizados en esta investigación, es posible determinar si un perfil está más meteorizado que otro, en este caso, el perfil originado de las anfibolitas de Medellín, presenta un mayor grado de meteorización que el perfil originado del neis de Iguaná, teniendo en cuenta que en el perfil de las anfibolitas predominan los anfíboles y en el perfil del neis de la Iguaná, el cuarzo (más resistente a la meteorización); adicionalmente, el perfil de las anfibolitas presenta mayor proporción de minerales de arcilla, estructura más agregada y porosa hacia la superficie y sus límites de consistencia, relación de vacíos, porosidad, porcentaje de partículas finas y succión, son mayores para cada nivel comparado con el neis de la Iguaná (Ver Tabla 5.11).
- En cuanto a la metodología empleada en la realización de la investigación, es importante analizar varios aspectos. Uno de ellos es la técnica de muestreo, aunque esta fue ejecutada con todos los cuidados necesarios para no ser alterada (en el caso de que se requirieran muestras inalteradas), según Fookes (2004), “los suelos residuales generalmente tiene una estructura frágil y pueden sufrir daños irreversibles debido a la expansión volumétrica aún en el caso de ser tomadas muy cuidadosamente”, entonces, es importante preguntarse ¿hasta que punto se puede alterar la microestructura por muestreo y que tan cercanos son los análisis microestructurales de laboratorio, con lo que está ocurriendo en campo?. Otro aspecto importante de analizar es el tamaño de la muestra, en muchos de los ensayos, por ejemplo, para el ensayo de determinación de la porosidad con el PORESIZER, a pesar de ser esta técnica de bastante utilidad para el entendimiento y correlación de los resultados con otras técnicas, como la determinación de la relación de vacíos, consolidación confinada y estructura por SEM, el tamaño de la muestra utilizada es demasiado pequeño, dejando dudas sobre la representatividad del ensayo. Sería igualmente importante, explorar más a fondo el efecto que tiene en la microestructura el secado y la impregnación de la muestra con resina, esta resina para trabajos futuros podría ser teñida con un color que permita una más clara visualización de los minerales en el microscopio óptico y electrónico. Adicionalmente, a las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido, se les podría realizar un tratamiento de imágenes por medio de un software que permita obtener mucha más información. Finalmente, a pesar de que la metodología empleada permitió caracterizar adecuadamente los perfiles en estudio, hubiese sido ideal poder contar con una mayor cantidad de niveles en un perfil y varios puntos dentro de cada nivel, hecho restringido por los altos costos y el gran tiempo requerido para la preparación y la ejecución de estos análisis, pero esta investigación es un importante avance, en la búsqueda del entendimiento de nuestros suelos tropicales.

- De los análisis mineralógicos se observa que, en la difracción de rayos-X para el neis de la Iguaá, no se identificaron las plagioclasas en el nivel 2, pero fue posible la identificación de óxidos e hidróxidos de hierro con la microscopía óptica y el SEM; la difracción al igual que el SEM permitió detectar el tipo de minerales de arcillas presentes. Para las anfibolitas de Medellín, por SEM no se encontró el cuarzo en ninguno de los niveles, el cual si se halló por las otras dos técnicas; igualmente, por SEM y microscopía óptica no se encontraron anfibolitas en los niveles 1 y 2, pero como en el caso del neis la técnica de difracción y el uso del SEM, permitieron detectar el tipo de arcillas. Es decir, una sola técnica no es suficiente, todas se complementan entre sí.
- Para verificar la representatividad de los perfiles estudiados, se analizaron algunas propiedades índice y composición química de otros dos perfiles complementarios por formación. La comparación de resultados han permitido verificar que son pocas las variaciones en estos aspectos y que puede entonces, considerarse representativos los perfiles estudiados con rigor (Anexo 1 y 2).
- Esta investigación presenta aportes importantes para el análisis de los suelos tropicales locales, como el encontrar que nuestros suelos pueden ser clasificados correctamente por el método MCT rápido, el cual brinda mayor información sobre las características del material y que inclusive, se puede llegar a obtener el límite líquido (w_l) a partir de las humedades del ensayo MCT (w_b). Adicionalmente, se consiguió obtener el valor de la cohesión aparente (c) y el ϕ^b , a partir del ensayo de tracción; sin embargo, esta última técnica se debe refinar en aspectos tales como el definir la geometría más adecuada para los cuerpos de prueba.
- Fue posible proponer un Índice de alteración para los perfiles tropicales, denominado (I.A.), este índice califica el grado de alteración del perfil y es bastante coincidente con los resultados obtenidos por caracterización física, química y mineralógica; sin embargo un mayor número de resultados dará más peso estadístico. Este índice es una modificación al índice propuesto por Mesa y Solano (2004), en el cual no es clara, desde el punto de vista geotécnico, la diferencia entre suelo residual y suelo completamente alterado, en cambio el planteado en la investigación hace diferencia entre si el suelo es muy alterado o moderadamente alterado, adicionalmente el índice de Mesa y Solano no tiene en cuenta el aporte de todos los minerales primarios en la formación de los minerales secundarios.

- El presente estudio muestra que en algunos lugares, la relación de vacíos inicial puede llegar a ser mayor que la relación de vacíos en el límite líquido, indicando que el talud tiene tendencia a fluir al saturarse, por lo cual es recomendable estudiar más a fondo la variación del comportamiento mecánico con la succión y realizar un monitoreo climático y de humedad de las zonas críticas.
- Los valores de cohesión (c^*) obtenidos para estos perfiles metamórficos, confirman la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, que al ser hidratados presentan propiedades cementantes que contribuyen para procesos de formación de concreciones lateríticas. Los altos valores encontrados para el ángulo de fricción (ϕ) son comunes en nuestros suelos, debido a que son suelos que no alcanzan a presentar altas meteorizaciones; además, al disminuir la profundidad se tiene un menor patrón de arreglo de partículas y las fallas se presentan irregulares en el contacto entre minerales cristalinos y minerales más finos.
- Aunque para los perfiles en estudio se determinó el potencial de colapso, es recomendable determinarlo de forma más exacta, una sola técnica no puede ser definitiva para precisar esta característica de un suelo. Se recomienda entonces para futuros estudios, ejecutar los ensayos de compresión confinada, saturados y no saturados.
- Es importante considerar la influencia de la succión en el análisis de problemas de ingeniería como son los casos de estabilidad de taludes y capacidad de soporte de fundaciones (Camapum, 2004). En suelos muy secos, la succión es más elevada y el suelo es más sensible a variaciones de humedad, que generan fatiga del suelo perdiendo resistencia.
- Las técnicas de caracterización aplicadas en esta investigación, son apropiadas para determinar la influencia de la meteorización en las propiedades y comportamiento en cualquier tipo de formación, ya que estas técnicas comenzaron a ser usadas por Castaño (2002), luego por Mesa y Solano (2004) y actualmente por Echeverri (2005) en otro tipo de formaciones como el stock de Ovejas, el stock de San Diego y el stock de Altavista, obteniendo al igual resultados acertados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVAREZ, I., CHÁVEZ, N. y FERNÁNDEZ, R. Estudio del efecto de la aplicación de bacterias en la respuesta mecánica de suelos de subrasante, Etapa 4. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia. 2004.

ARANGO, J. Un método de valoración cualitativa del grado de meteorización de suelos tropicales para la ciudad de Medellín. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia. 2000.

ARAKI, M. Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsáveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, 1997.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Code of practice for site investigations: BS5930, London, 1981.

BUENO, F , SOUZA, E., MOREIRA, W y CAMAPUM, J.. Papel dos oxi-hidróxidos de Fe e de Al no grau de agregação de solos do Distrito Federal. En: I Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no Centro-Oeste. Universidade de Brasília, 2003. p 155-164.

CAMAPUM, J. Disciplina: Geotecnia dos solos tropicais –Notas de aula. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília, 2004.

CASTAÑO, N. Influencia de la microestructura en el comportamiento anisotrópico de los parámetros resistencia y compresibilidad de un suelo residual del batolito antioqueño. En: Memorias del IX Congreso Colombiano de Geotecnia. Medellín, 2002.

CORRALES, J. y LEOZ, F. Succión matricial de suelos como parámetros de estabilidad de taludes. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1996.

CRUZ, M. Desagregação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade de Brasília, 2003.

DUARTE, I. y GOMES, E. Introdução à mecânica das rochas. Editor UFV, Brasil, 2002. pag 71-72.

DONIZETE, I., MOREIRA, N. y COUTINHO, C. Uso do Granulômetro a Laser para análise granulométrica da fração na peneira # 40 de solos tropicais. En: I Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no Centro-Oeste. Universidade de Brasília, 2003. p 195-200.

ECHEVERRI, O. Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas ígneas presentes en Medellín. Tesis sin publicar. Universidad Nacional de Colombia, 2005.

EMBRAPA, Manual de métodos de análise de solo. Centro Nacional de Pesquisa do solo, 2ª edição. Rio de Janeiro, 1997.

FREDLUND, D., MORGENSTERN, N. y WIDGER, R. The shear strength unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, vol 15, p 313-321, 1978.

FREDLUND, D., RAHADJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. Jhon Wiley & Sons Inc., New York, 1993.

FREDLUND, D. Implementación de la mecánica del suelo parcialmente saturado. Hombre nuevo editores, Traducida por Fabián Hoyos Patiño, Medellín, 2003.

FOOKES, P. Suelos residuales tropicales. Hombre Nuevo Editores. Traducida por Fabián Hoyos Patiño, Medellín, 2004.

GARCIA, M. Estructura de los filosilicatos. www.uned.es/cristamine/mineral/. 2004.

GEOTECHNICAL CONTROL OFFICE. CIVIL ENGINEERING SERVICES DEPARTMENT HONG KONG. Geoguide 3. Guide to rock and soil descriptions. 1ª Ed. 1988.

GIDIGASU, M. Laterite soil engineering. Pedogenesis and Engineering Principles. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. Chapters 3 y 4.

GIMARÃES, R. y CAMAPUM, J. Influência da microestructura nas propriedades mineralógicas e físicas de um perfil de solo do Distrito Federal. En: I Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no Centro-Oeste. Universidade de Brasília, 2003. p 155-164.

HOYOS, F. Geotecnia. Diccionario Básico. Medellín: Hombre Nuevo Editores, 2001. p. 182.

JARAMILLO, D. Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2002. p.614.

MALAGÓN, D. et al. Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC: Bogotá, 1995. p.632.

MARQUEZ, G. Propiedades Ingenieriles de los suelos. Medellin: Universidad Nacional de Colombia, 1982.

MANUAL PORESIZER 9320. Laboratorio de Yacimientos y Fluidos de perforación, Universidad Nacional de Colombia, 2002.

MARINHO, F. Medição de sucção com o método do papel filtro. Imperial College, United Kingdom, 1995.

MEJÍA, L. La relación clima - suelo I: Influencia del clima en la formación y características de los suelos. Bogotá: C.I.A.F, 1981. p. 46.

MENDES, E. Disciplina: Identificação de argilominerais por difratometria de raios-x - Notas de aula. Departamento de mineralogia e petrologia. Universidade de Brasilia, 2004.

MESA, M y SOLANO, J. Influencia de las fases mineralógicas y sus relaciones microestructurales en las tendencias del comportamiento mecánico: resistencia y compresibilidad en suelos tropicales del Stock. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellin, 2004.

MITCHELL, J. Fundamentals of soil behavior. Second Edition. Berkeley: California University, 1992. Chapter 2, 3, 5, 8 y 11.

NOGAMI, J. y VILLIBOR, D. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Brasil, 1995.

NORMA ASTM Standard D422 y 422-63: Method for Particle-Size Analysis of Soils.

NORMA ASTM Standard D4218: Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

NORMA ASTM Standard D854-92: Test Method for Specific Gravity of Soils.

NORMA ASTM Standard D2166-91: Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.

NORMA ASTM Standard D2216-92: Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock.

NORMA ASTM Standard D2435-70: Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.

NORMA ASTM Standard D3080-90: Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions.

NORMA ASTM Standard D5298-92: Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.

PAGINA WEB: www.uned.es/cristamine/mineral/. 2004

PANADIAN, N, NAGARAJ T., AND L. SIVAKUMAR G. Tropical clays. I: Index properties and microstructural aspects. En: Journal of geotechnical engineering, mayo 1993. v. 9 No. 5, p. 826-839.

PARRA, L. Y BLANDÓN. A. Geomorfología, Petrografía y tectónica de la cuenca del río concepción. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá 1983. p.254.

PELTIER, L. The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. Ann. Assoc. Geol., 40:214-240, 1950.

RENDÓN, D., Cartografía y caracterización de las unidades geológicas de la zona urbana de Medellín, Universidad Nacional, 1999.

RESTREPO, J. y TOUSSAINT, J. Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. En. Primera Conferencia sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. Soc. Col. Geol. Medellín, 1984.

SECRETARÍA DE PLANEACIÓN. La amenaza y la vulnerabilidad en el análisis de riesgos, la micro cuenca de la quebrada la Iguaná. Medellín, 1998.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. (SSSA). Glossary of Soil Science terms. SSSA. Madison, 1984. p.38.

STRAKHOV, N. Principles of lithogenesis. London: Oliver and Boyd, 1967. v. 1. p.245.

TARBUCK, E. y LUTGENS, F. Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física. Sexta Edición. Madrid: Prentice Hall, 2001. p. 23-55.

THORNTHW AITE, C. An approach to rational classification of climate. Geogr. Rev.,38, 1948. p. 55-94.

TOWNSEND, F. Geotechnical characteristics of residual soil. En: JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING, enero 1985. v. 111 No. 1, p. 77-94.

VARGAS, M. Structurally instable soils in Southern Brazil. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, 1973. 2, 239-246.

Anexo 1

a) Análisis químico perfiles del neis de la Iguaná

		neis de la Iguaná								
		Perfil principal			Perfil N° 2			Perfil N° 3		
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
pH (agua)		5.4	5.7	6.7	4.7	5.5	6.2	8.2	5	6.4
pH (KCL)		3.8	4.1	5.2	4	3.7	4.3	7.1	3.8	4.4
(cmol _c /dm ³ =mE/100ml)										
Calcio + Magnesio	Ca+Mg	0.9	2.3	4.2	0.5	0.9	4.4	15.6	0.7	6.3
Calcio	Ca	0.5	1.4	2.8	0.3	0.5	3.4	14.8	0.4	4.4
Magnesio	Mg	0.4	0.9	1.4	0.2	0.4	1	0.8	0.3	1.9
Potasio	K	0.05	0.3	0.09	0.05	0.09	0.13	0.11	0.22	0.08
Sodio	Na	0.34	0.07	0.13	0.14	0.24	0.09	0.15	0.45	0.48
Valor S	S	1.29	2.67	4.42	0.69	1.23	4.62	15.86	1.37	6.86
Aluminio	Al	3.9	0.7	0.1	1.8	2.1	0.2	0	1	0.1
Acidez Total	H+Al	10.5	2.2	1.5	4.3	5.4	1.6	1.4	3.4	1.5
Valor C.I.C	C.I.C	11.79	4.87	5.92	4.99	6.63	6.22	17.26	4.77	8.36
Saturación de aluminio	%Al	75	21	2	72	63	4	0	42	1
Saturación de bases	%B	11	55	75	14	19	74	92	29	82
Carbono orgánico - C	g/kg	11.3	3.6	3.6	4.2	3.6	3.6	6.3	6	3.6
Materia orgánica - MO	g/kg	19.4	6.2	6.2	7.2	6.2	6.2	10.8	10.3	6.2
Fósforo (P)	mg/dm ³	27	4.2	0.9	14	3.6	2.9	20.5	14	10.7

Anexo 1
b) Análisis químico perfiles metamórficos

		anfibolitas de Medellín								
		Perfil principal			Perfil N° 2			Perfil N° 3		
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
pH (agua)		5.5	6.5	6.9	6.4	6.8	7.1	5.2	6.5	8.6
pH (KCL)		4.1	4.5	4.5	4.7	4	4.6	3.7	4.3	6.9
(cmol./dm ³ =mE/100ml)										
Calcio + Magnesio	Ca+Mg	1.3	16.2	14.4	6.1	14.9	8.1	0.7	4.4	10.5
Calcio	Ca	0.7	14.6	12.5	4.4	13.1	6.2	0.4	3.3	8.6
Magnesio	Mg	0.6	1.6	1.9	1.7	1.8	1.9	0.3	1.1	1.9
Potasio	K	0.02	0.04	0.06	0.03	0.03	0.05	0.04	0.08	0.05
Sodio	Na	0.04	0.13	0.22	0.2	0.2	0.14	0.13	0.19	0.4
Valor S	S	1.36	16.37	14.68	6.33	15.13	8.29	0.87	4.67	10.95
Aluminio	Al	1.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	1.3	0.3	0
Acidez Total	H+Al	5	2.2	1.9	2	2	1.6	3.7	2	1.3
Valor C.I.C	C.I.C	6.36	18.57	16.58	8.33	17.13	9.89	4.57	6.67	12.25
Saturación de aluminio	%Al	52	2	1	3	1	2	60	6	0
Saturación de bases	%B	21	88	89	76	88	84	19	70	89
Carbono orgánico - C	g/kg	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Materia orgánica - MO	g/kg	6.2	6.2	6.5	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Fósforo (P)	mg/dm ³	2.9	4.9	2.9	1.6	2.2	4.9	1.6	27	26.4

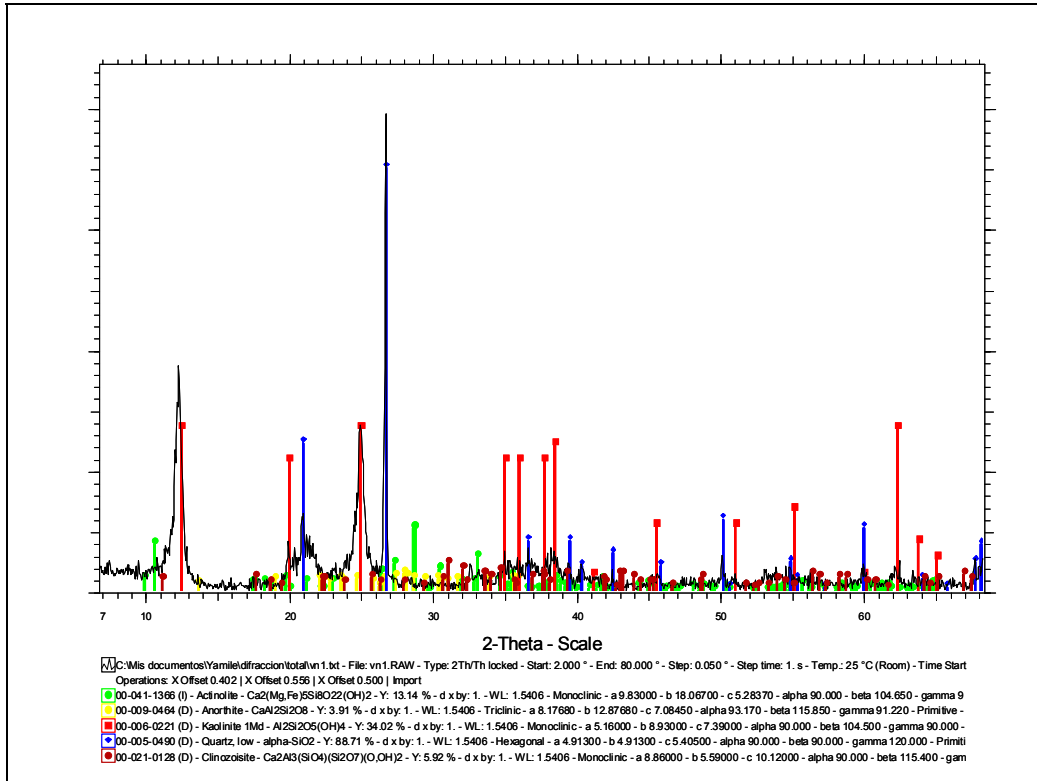
Anexo 2
Caracterización física perfiles 2 y 3 del neis de la Iguaná y las anfibolitas de Medellín

anfibolitas de Medellín	HUMEDAD NATURAL (%)	LÍMITE LIQUIDO	INDICE PLASTICO	Gs	P200	USC
Perfil 2-nivel 1	39	52	7		89.8	MH
Perfil 2-nivel 2	40	46	7	2.68	83.4	ML
Perfil 2-nivel 3	16	28	NP		35.1	SM
Perfil 3-nivel 1	52	76	25		96.7	MH
Perfil 3-nivel 2	36	42	2	2.97	52.4	SM
Perfil 3-nivel 3	16	34	4		40.6	SM

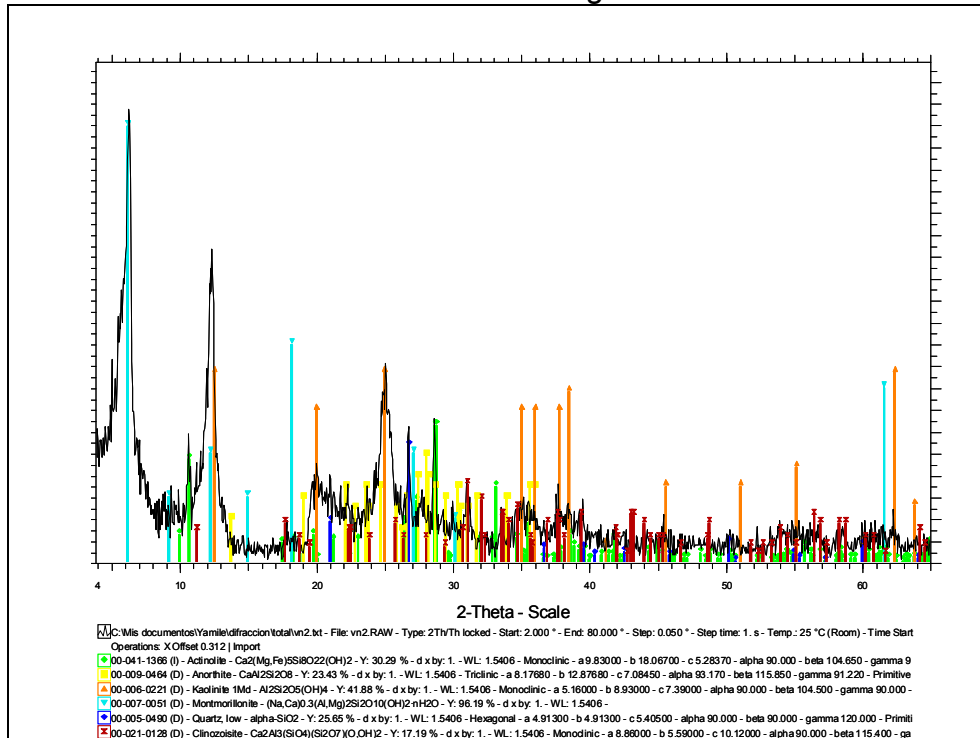
neis de la Iguaná	HUMEDAD NATURAL (%)	LÍMITE LIQUIDO	INDICE PLASTICO	Gs	P200	USC
Perfil 2-nivel 1	12	31	5		56.3	ML
Perfil 2-nivel 2	29	68	21	2.67	96.8	MH
Perfil 2-nivel 3	11	37	NP		55.3	ML
Perfil 3-nivel 1	8	32	5		51	ML
Perfil 3-nivel 2	5	37	6	2.6	74.5	ML
Perfil 3-nivel 3	1	35	NP		48.7	SM

Anexo 3

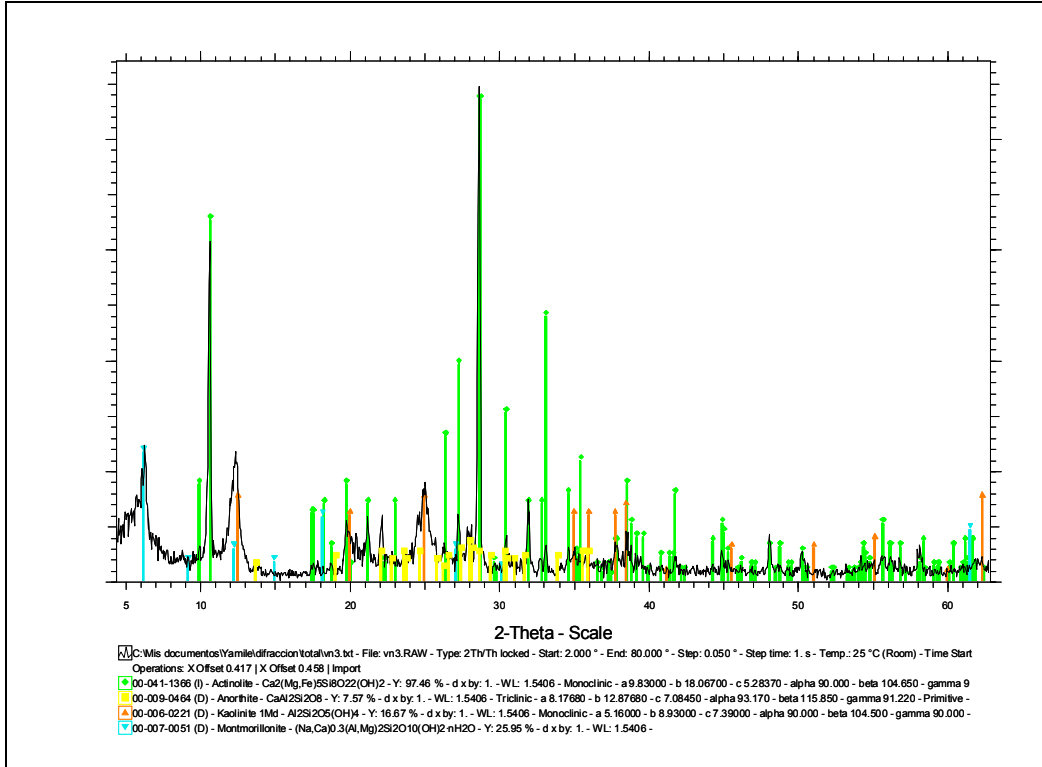
Difractogramas perfiles principales neis de la Iguaná y anfibolitas de Medellín



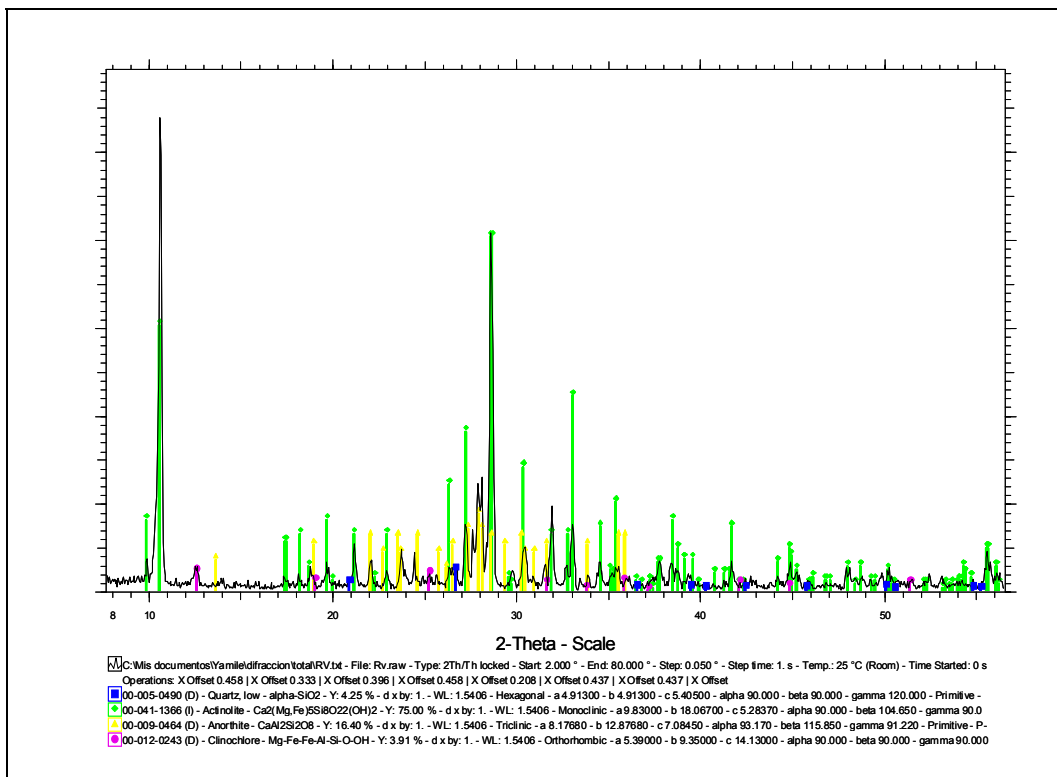
Nivel 1 neis de la Iguaná



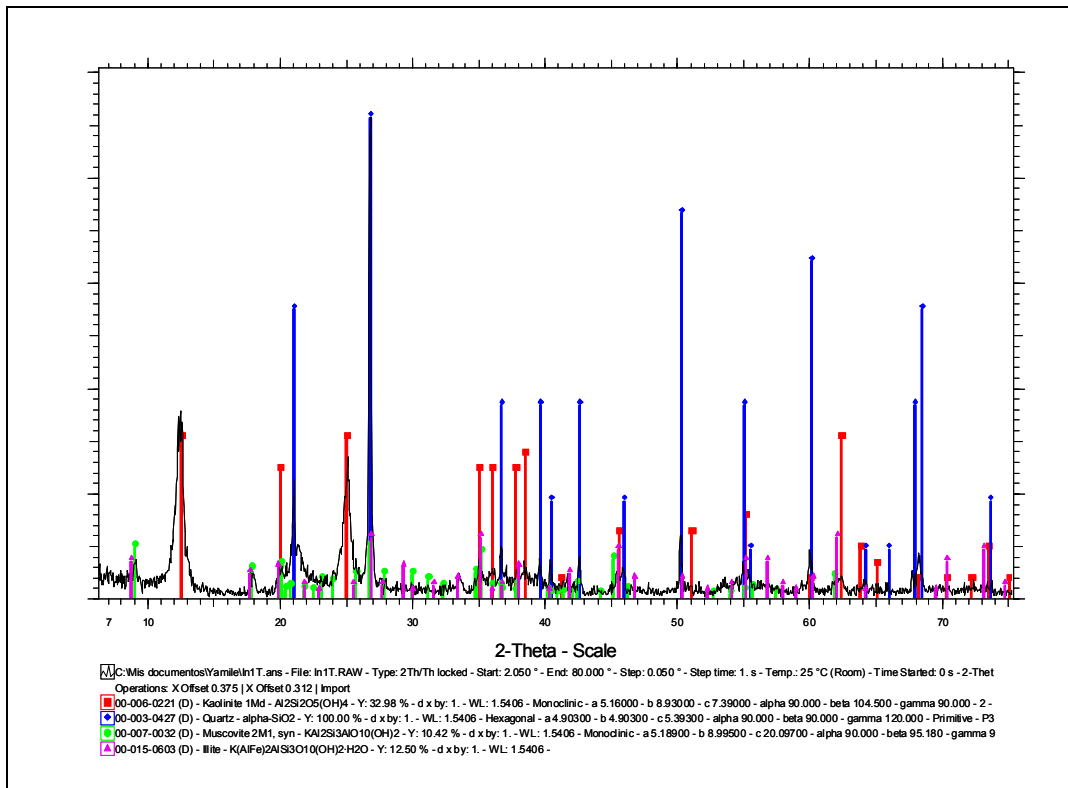
Nivel 2 neis de la Iguaná



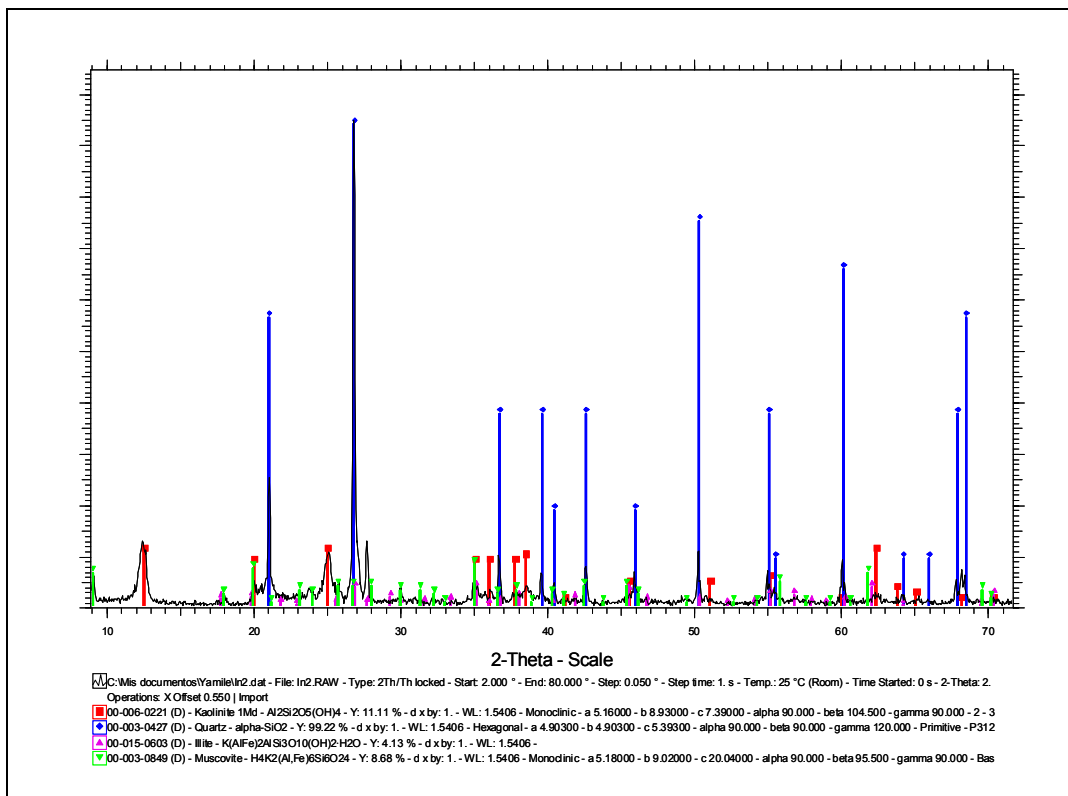
Nivel 3 neis de la Iguaná



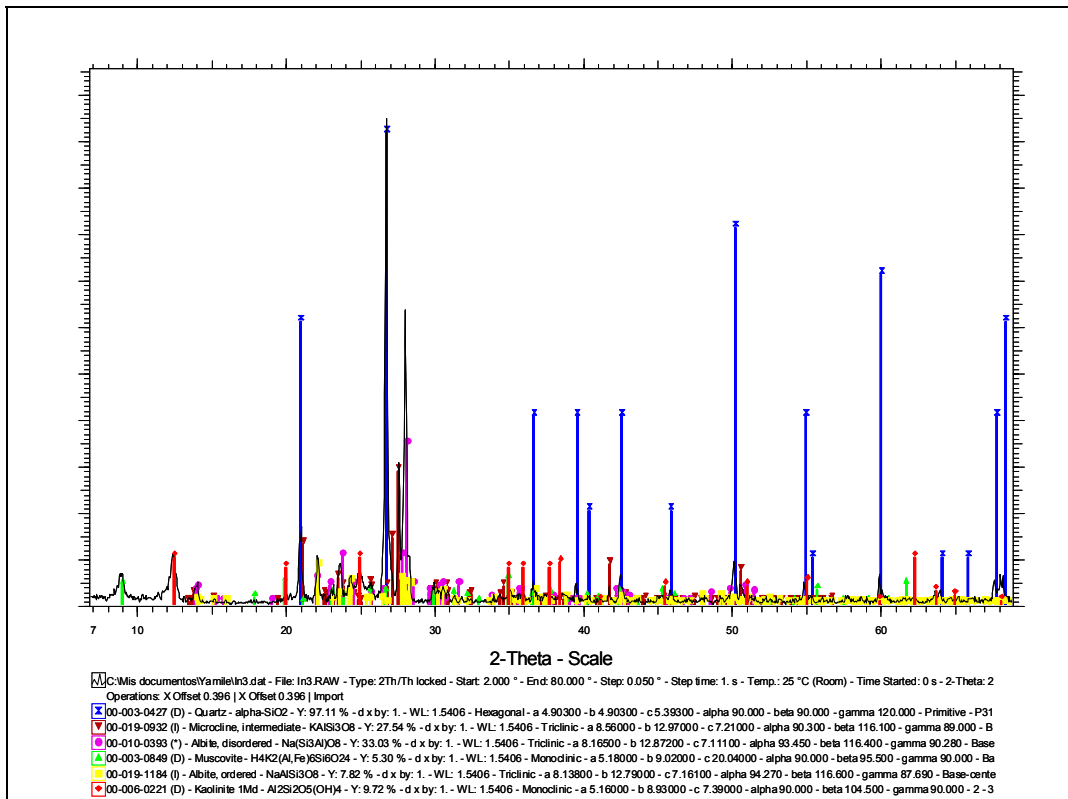
Roca neis de la Iguaná



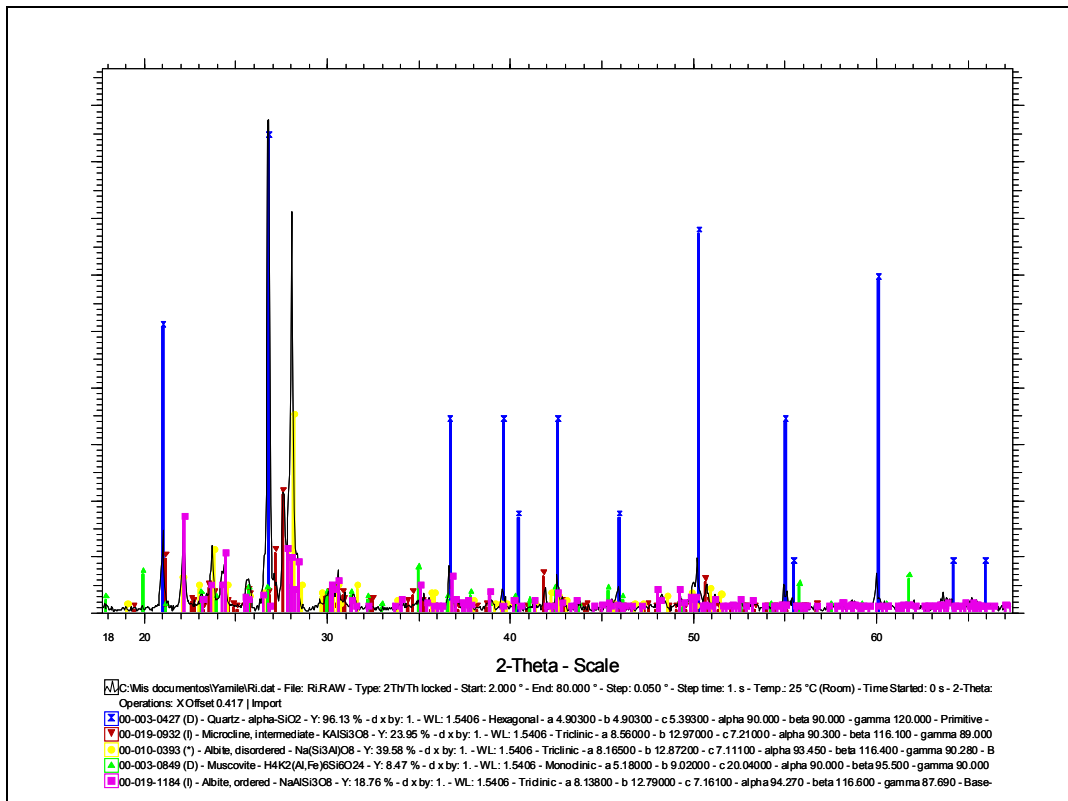
Nivel 1 anfibolitas de Medellín



Nivel 2 anfibolitas de Medellín



Nivel 3 anfibolitas de Medellín



Roca anfibolitas de Medellín

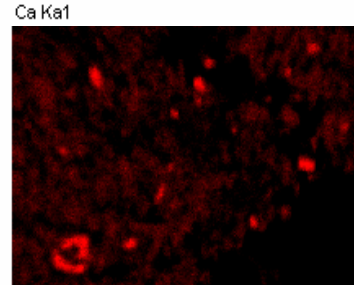
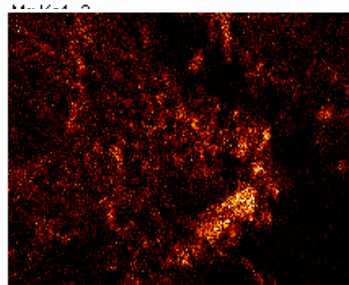
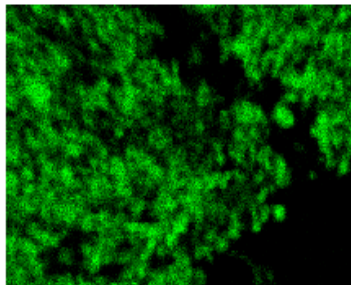
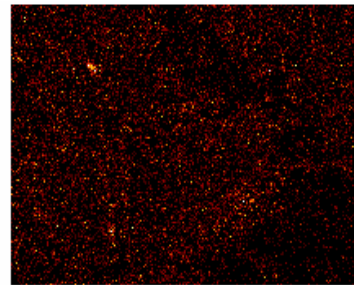
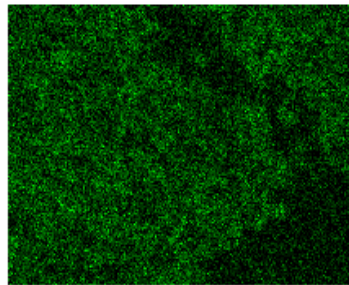
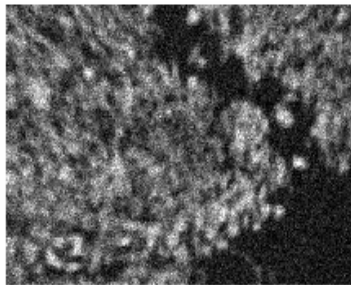
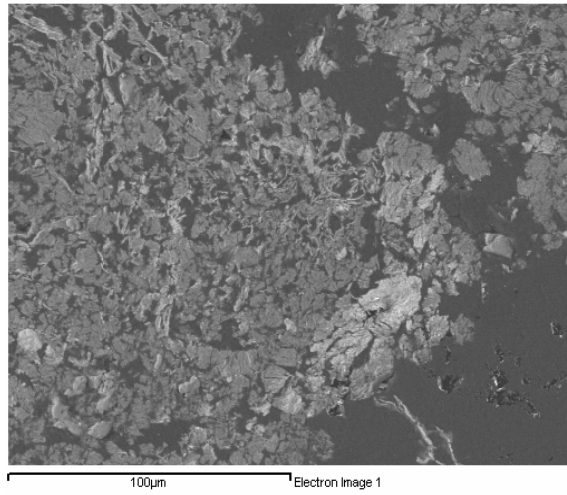
Anexo 4

Valores de c y ϕ por cizallamiento directo con los puntos residuales

Nivel	neis Iguaná		anfibolitas de Medellín	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
1	44.7	31.9	5.31	43.6
2	21.9	32.13	2.99	41.8
3	3.6	47.02	19.7	38.2

Anexo 5

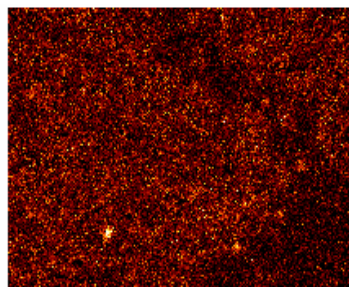
Mapa composicional Nivel 1 - Anfibolitas de Medellín



Al Ka1

Fe Ka1

Si Ka1



Na Ka1_2