

CONTRIBUCIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PERFILES
DE METEORIZACIÓN DE ROCAS CRISTALINAS, EXPUESTOS AL ORIENTE
DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.

MARIA CAMILA FORERO QUINTERO

MARÍA ALEJANDRA FUENTES RUEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2015

CONTRIBUCIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PERFILES
DE METEORIZACIÓN DE ROCAS CRISTALINAS, EXPUESTOS AL ORIENTE
DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.

MARIA CAMILA FORERO QUINTERO

MARÍA ALEJANDRA FUENTES RUEDA

Pasantía de Investigación para optar el título de Geólogo(a)

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Doctor en geología.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

A la madre tierra, madre de todas y todos.

A la memoria viva y latente junto a mí, de mi padre Aníbal Forero Meza, gracias por tu fuerza, conocimiento y amor a pesar de la distancia; todos los días el recuerdo de tus palabras fueron el aliento y el ánimo para seguir adelante.

A la mujer más hermosa de todos los Jardines, mi madrecita Carmenza Quintero Carreño, a quien le agradezco su apoyo y su amor incondicional, sus palabras sencillas y humildes, su sonrisa de cielo y sus abrazos de amor en cada momento.

A mis hermanos Oscar Mauricio Forero Quintero, José Fernando Forero Quintero y Jessika Katherine Hernández, por su compañía, amistad y complicidad en las aventuras de la familia.

A mi sobrinito Aníbal José, para que crezca inquieto, en búsqueda de su felicidad y en la construcción de un mundo mejor.

A mi compañera de Tesis, María Alejandra Fuentes Rueda, quien aceptó este reto junto a mí, quien me enseñó la paciencia y las ganas de salir adelante y quien por supuesto es mi amiga.

*Y a todos y todas que con su compañía hicieron que cada día fuera único, que
sonríen y caminan hacia una transformación, para que los días venideros sean
mejores.*

Con agradecimiento en el corazón...

Maria Camila Forero Quintero

Me siento totalmente agradecida con Dios quien me abrió caminos y me guio hasta aquí; dedicado a mi familia, especialmente a mis padres Ciro Alfonso Fuentes y Gloria Rueda, a quien les debo la alegría y el orgullo de culminar ésta etapa, pues con su esfuerzo, amor, sabiduría y apoyo incondicional hoy soy lo que soy. A mi esposo Wilson Flórez por su comprensión, en los momentos difíciles, por creer en mí y animarme para seguir adelante cuando se agotaban mis fuerzas. Gracias infinitas a aquellas personas que cuidaron a mi hija Sofía y ayudaron a su sano desarrollo mientras yo cumplía con mis deberes académicos y dedicaba el tiempo necesario para hacer esto posible. No podría terminar estos agradecimientos sin mencionar a mi compañera Maria Camila quien con sus conocimientos, compromiso, dedicación, buena energía y alegría la realización de esta investigación fue más amena.

María Alejandra Fuentes R.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) su directora y quien es nuestra codirectora del proyecto, la profesora Sully Gómez, a nuestro director, Doctor en geología Juan Diego Colegial Gutiérrez, quien gracias a su orientación, dedicación, y acompañamiento en cada una de las actividades realizadas, se logró finalizar con éxito esta investigación.

A los señores José y Benito por su acompañamiento durante la realización de la salida de campo, su buena compañía y paciencia; a los habitantes de las veredas El Granadillo, Las Palmas, Pozo Negro, Cristales, La Mata, Las Rosas y Faltriquera, por su confianza al permitirnos trasladarnos y tomar muestras de roca de sus predios.

Al Profesor Carlos Alberto Ríos Reyes, director del Laboratorio de Microscopía Electrónica y al equipo profesional del Laboratorio, por su colaboración, ayuda y disposición en la identificación de minerales arcilla.

A Luis Eduardo Garrido técnico del laboratorio de Geología por el préstamo del material y a Jairo por la ayuda en el laboratorio de Materiales de la Escuela de Ing. Civil.

Al Director del Laboratorio de Petrofísica, Hernando Buendía y a Mauricio Álvarez técnico del mismo por su inmensa colaboración en cada una de las pruebas realizadas en dicho laboratorio.

Por Último a nuestros compañeros y colegas Mayra Alejandra Vargas y Jesús Leonardo Rincón por su colaboración en el manejo de ARGIS y su alegría en los días de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	29
1. OBJETIVOS.....	32
1.1 OBJETIVO GENERAL	32
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
2. JUSTIFICACIÓN.....	34
3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.	36
3.1 VÍAS DE ACCESO.	37
3.2 ASPECTOS ATMOSFÉRICOS Y CLIMÁTICOS	39
3.3 VEGETACIÓN.....	40
3.4 HIDROGRAFÍA	42
3.5 PRECIPITACIÓN	44
4. METODOLOGÍA	46
4.1 FASE 1: DOCUMENTACIÓN	46
4.2 FASE 2: RECONOCIMIENTO DE CAMPO Y DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	46
4.3 FASE 3: RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO.....	46
4.4 FASE 4: PRUEBAS DE LABORATORIO	49
4.4.1 Análisis petrográfico mediante secciones delgadas.	49
4.4.2 Análisis granulométrico	51
4.4.3 Análisis de humedad relativa.....	53
4.4.4 Microscopia electrónica de barrido	54
4.4.5 Fluorescencia de rayos x.....	55

4.4.6 Difracción de rayos x	56
4.4.7 Ensayos de porosidad	57
4.5 FASE 5: REVISIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO Y EN CAMPO	58
4.6 FASE 6: EDICIÓN DOCUMENTO FINAL	59
5. MARCO TEÓRICO	60
5.1 DEFINICIÓN DE METEORIZACIÓN	60
5.2 PROCESOS DE METEORIZACIÓN.....	60
5.3. MODELOS CONCEPTUALES DE METEORIZACIÓN	61
5.4. PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS EN ROCAS CRISTALINAS	65
6. MARCO GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL	66
6.1. FALLA DE BUCARAMANGA.....	67
6.2. CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA 1:10.000	67
6.2.1 Neis de Bucaramanga.....	68
6.2.2 Grupo plutónico de Santander.....	70
7. RESULTADOS.....	73
7.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS INTERVALOS DE METEORIZACIÓN MEDIANTE LAS OBSERVACIONES DE CAMPO	73
7.1.1 Perfil de Roca Metamórfica	75
7.1.2 Perfil de roca ígnea	81
7.2 DEFINICIÓN DEL PERFIL DE METEORIZACIÓN NÉISICO Y GRANODIORÍTICO.....	87
7.2.1 Secuencia de los intervalos de meteorización mediante propiedades físicas observadas en Muestras de mano.	88
7.2.2. Espesores y Columna generalizada	89

7.2.3 Curva Granulométrica	93
7.2.4 Porcentaje de Humedad Relativa en los diferentes perfiles de meteorización	96
7.3 ANÁLISIS PETROGRÁFICO	99
7.3.1 Análisis petrográfico de Secciones Delgadas.....	99
7.3.2 Análisis petrográfico mediante Imágenes de microscopia electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX).	109
7.4 ANÁLISIS QUÍMICO: FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	119
7.4.1 Pérdida por Ignición (Loss On Ignition)	121
7.4.2 Contenido de Óxidos Mayores	122
7.4.3 Análisis de Índices de Meteorización y Alteración	128
7.5 ENSAYO DE POROSIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DEL POROSÍMETRO DE HELIO (BASADO EN LA LEY DE BOYLE) (NORMA API RP-40)	130
7.6 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS	135
7.6.1 Perfil de roca Neísica	135
7.6.2 Perfil de roca Granodiorítica.....	139
8. DISCUSIÓN	143
8.1 PERFIL DE ROCA NEÍSICA	143
8.2 PERFIL DE ROCA GRANODIORÍTICA.....	145
9. CONCLUSIONES	149
10. RECOMENDACIONES	152
BIBLIOGRAFÍA.....	154

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Recopilación bibliográfica de modelos conceptuales de Meteorización. Tomado y modificado de: González et al., 2002. Ingeniería Geológica. Capítulo 2: Mecánica de Suelos; Pág. 19.	62
TABLA 2. Recopilación de modelos conceptuales según los siguientes autores: ISRM (1981), Dewandel et al (2006) y Borrelli et al (2013), en donde se reúnen las características físicas relevantes para los diferentes intervalo de meteorización.	¡Error! Marcador no definido.
TABLA 3. Degradación del color desarrollado en cada uno de los perfiles demeteorización. Colores tomados de Munsell (1994).	74
TABLA 4. Medida Cualitativa Grado de Resistencia Mecánica, utilizado para la caracterización de ambos perfiles de meteorización (Roca Ígnea y Metamórfica). Tomado y modificado de ISRM (1981).	74
TABLA 5. Valores de resistencia mecánica, tomados con el martillo de Schmidt, en Roca Néisica, (parte superior de la tabla) y en Roca Granodiorítica (parte inferior de la tabla) para cada uno de los intervalos de meteorización, los cinco valores más bajos en cada intervalo, se descartaron al realizar el promedio correspondiente..	87
TABLA 6. Representación de cada uno de los análisis físico-químicos aplicados a las diferentes muestras, como se observa en la tabla parte superior perfil de meteorización Néisico, parte inferior perfil de roca Granodiorítica.	88
TABLA 7. Espesores determinados por las estaciones de campo de cada una de las litologías (Granodiorita - Superior, Neis – Inferior).	90

TABLA 8. Datos de los porcentajes retenidos en cada uno de los tamices; el perfil de roca Néisica observado en la parte superior de la tabla, perfil de roca Granodiorítica parte inferior de la misma.	94
TABLA 9. Datos correspondientes al perfil de roca néisico (parte superior) y roca Granodiorítica (parte inferior), con los cuales se determina el porcentaje de humedad relativa.	¡Error! Marcador no definido.
TABLA 10. Mineralógica identificada para cada uno de los intervalos de meteorización de roca Néisica con su respectivo porcentaje, junto con la porosidad observada en sección delgada.	103
TABLA 11. Mineralogía identificada para cada uno de los intervalos de meteorización de roca Granodiorítica con su respectivo porcentaje, junto con la porosidad observada en sección delgada.....	108
TABLA 12. Porcentajes correspondientes a los óxidos mayores para el perfil de roca Granodiorítica (parte superior) y perfil de roca Néisica (parte inferior)	120
TABLA 13. Volumen de los discos determinado por el fabricante de los discos..	133
TABLA 14. Datos obtenidos del Ensayo de porosidad para el perfil de Roca Neísica (superior) y Perfil de Roca Granodiorítica (inferior).....	134

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de localización del área de estudio, ubicación en el departamento de Santander.36
- Figura 2: a) La imagen representa los afloramientos que conforman ambos perfiles de meteorización, las estaciones de color amarillo indican litologías Metamórfica, las de color blanco litologías Ígneas, las de color azul indican intrusión de roca ígnea en roca metamórfica y las de color naranja representan un horizonte de Suelo Residual b) la zona de estudio delimitada en color azul, en donde se muestran los Carreteables utilizados para la identificación de las diferentes litologías el Carreteable: ICP - Vereda Pozo Negro (roca metamórfica), Carreteable: Pozo Negro – Vereda Cristales (rocas ígneas) y Suelo Residual ubicados en la Vereda la Mata Baja.....38
- Figura 3: Temperatura media anual (°C). La estrella representa el área de estudio, en el municipio de Piedecuesta. Santander, mostrando las correspondientes temperaturas según el piso térmico: Templado y Frío.40
- Figura 4: Zonas de vida según Holdridge, departamento de Santander. La estrella representa el área de estudio.41
- Figura 5: La imagen de la izquierda representa la Cuenca superior del Río Lebrija identificada por el Ideam con el código 2319 y sus ocho subcuencas (Jurisdicción otorgada por la CDMB), parte Nororiental del departamento de Santander, la Subcuenca del Río de Oro se representa con el color amarillo (parte inferior) y la

delimitación de color Blanco demarca las microcuenca del Río Lato/Hato y Oro Alto (imagen derecha).....	43
Figura 6: Hidrografía de la Subcuenca del Río de Oro, conformada por las Microcuenca Oro Alto, Microcuenca Oro Medio, Microcuenca Oro Bajo, Microcuenca Río Lato y Microcuenca Río Frío.	44
Figura 7: Precipitación promedio mensual (mm). Los datos fueron recolectados en la Estación de la Universidad Industrial de Santander, a una elevación de 1018 msnm, Longitud: -73.10 y Latitud: 7.13.....	45
Figura 8: Precipitación total anual (mm). La estrella representa el área de estudio, en el municipio de Piedecuesta. Santander.	45
Figura 9: Diferenciación litológica de los afloramientos para cartografía de detalle. (a) Estación E38 ubicada en Vía Seminario San Alfonso - Alto de la Mata, 100 m arriba de la Finca Aurora, en la cual se observa contacto intrusivo de Cuarzomonzonita con Diorita; (b) Estación E35 situada Vía Seminario San Alfonso - Alto de la Mata, donde se observa contacto neto entre Tonalita y Granodiorita.	47
Figura 10: Muestras de mano tomadas en salida de campo que representan el intervalo de meteorización observado.	48
Figura 11: Ejemplificación de la descripción de campo y la diferenciación del material meteorizado en el afloramiento. Estación E36 ubicada en Autopista Piedecuesta - Bucaramanga, desvió Seminario San Alfonso – Vereda la Mata, Piedecuesta	48
Figura 12: Diagrama de Strekeisen (1976) para clasificación de rocas Ígneas Plutónicas.	50
Figura 13: Equipo y procedimiento utilizado en el Análisis Granulométrico; a) Soxhlet b) Dedal de Celulosa; c) Cuarteo de la muestra ya limpia, se selecciona pequeñas porciones de cada sección, hasta completar 100g de muestra representativa; d)	

Zaranda con los Tamices n° 8, 12, 35, 50, 100 y 200; e) pesaje de cantidad de muestra que quedo retenida en cada Tamiz.....	52
Figura 14: Equipo utilizado en el Análisis de Humedad Relativa.	53
.....	53
Figura 15: Equipo utilizado en Microscopia Electrónica de Barrido.	55
Figura 16: a) Equipo utilizado en Fluorescencia de Rayos X b) Equipo utilizado en Difracción de rayos X.....	56
Figura 17: Equipo utilizado para hallar porosidad: Porosímetro.....	58
Figura 18. Esquema tectónico del departamento de Santander.	66
Figura 19: muestras de mano que corresponden a los afloramientos del Neis de Bucaramanga, en la zona de estudio.....	69
Figura 20: Diorita perteneciente a la estación E29, ubicada en el Carreteable Vía ICP - Cristales, trayecto de Pozo Negro a la Vereda las Rosas; X= 1117616, Y= 1269168, Z= 2191.....	70
Figura 21: a) Granodiorita que aflora en la estación E20 ubicada en el Carreteable Vía ICP – Cristales, vereda las rosas; X= 1117860, Y= 1269231, Z= 2225; y b) Tonalita que aflora en la estación E29, ubicada en el Carreteable Vía ICP - Cristales, trayecto de Pozo Negro a la Vereda las Rosas; X= 1117616, Y= 1269168, Z= 2191.	71
Figura 22: Cuarzomonzonita que aflora en la estación E38, ubicada en el Carreteable Seminario San Alfonso – Alto de la Mata; X= 1113675, Y= 1269507, Z= 1378.....	72
Figura 23: Monzogranito que aflora en la estación E22, ubicada en el Carreteable ICP-Cristales, Vereda Las Rosas; X= 1117523, Y= 1268548, Z= 2125.	72

Figura 24: Las fotografías a) estación 1 (coordenadas X: 1.113.637, Y: 1.267.028 y Z: 1.139) y b) estación 9 (coordenadas X: 1.114.347 Y: 1.267.523 y Z: 1.408), representan al Intervalo de meteorización I de composición Neis Cuarzo Feldespático. En a) se diferenció que la parte inferior presenta fracturas más cerradas con respecto a la parte superior. Las líneas continuas representan las familias de diaclasas y las discontinuas los planos de foliación.75

Figura 25: Fotografías a) estación 25 (coordenadas X: 1.118.953, Y: 1.271.499 y Z: 2.353) y b) estación 26 (coordenadas X: 1118536 Y: 1.270.714 y Z: 2.416) del Intervalo de meteorización II de litología Neis Cuarzo Feldespático, la línea punteada representa los plano de foliación. 76

Figura 26: Fotografías a) Estación 7 Zona 1 (coordenadas X: 1.114.620 Y: 1.267.159 y Z: 1439) y Estación 45 (coordenadas X: 1.115.414 Y: 1.267.702 y Z: 1447) del Intervalo de meteorización III de litología Neis Cuarzo Feldespático, Las líneas punteadas representa los plano de foliación y las continuas las diaclasas. 77

Figura 27: en las fotografías a) Estación 3 (coordenadas X: 1.113.948 Y: 1.267.412 y Z: 1.273), b) estación 4 (coordenadas X: 1.114.164 Y: 1.267.383 y Z: 1.346), c) estación 14 (coordenadas X: 1.114.812 Y: 1.267.643 y Z: 1.516) y d) estación 37 (coordenadas X: 1.113.788 Y: 1.269.495 y Z: 1.384), del Intervalo de meteorización IV de litología Neis Cuarzo Feldespático, las líneas punteadas representan los planos de foliación.78

Figura 28: Fotografías a) Estación 10 (coordenadas X: 1.114.538 Y: 1.267.523 Z: 1.411), b) Estación 12 (coordenadas X: 1.114.657, Y: 1.1267.690 y Z: 1540) y c) Estación 13 (coordenadas X: 1.114.785, Y: 1.267.906 y Z: 1.448) del Intervalo de meteorización V de litología Neis Cuarzo Feldespático. Las líneas punteadas representan los planos de foliación de la roca original.79

Figura 29: Fotografías a) Estación 11 (coordenadas X: 1.114.851 Y: 1.267.690 y Z: 1.540) y b) Estación 44 (coordenadas X: 1.115.296 Y: 1.267.864 y Z: 1.491) del Intervalo de meteorización VI de litología Neis Cuarzo Feldespático.	80
Figura 30: Fotografías a) Estación 24 (coordenadas X: 1.117.173 Y: 1.267.750 y Z: 2047) y b) Estación 21 (coordenadas X: 1.117.674 Y: 1.268.912 y Z: 2.170) de composición Granodiorítica, pertenecen al intervalo de meteorización I del perfil de roca Ígnea.	81
Figura 31: Estación 20 (coordenadas X: 1.117.860, Y: 1.269.231 y Z: 2.225) en la cual se observaron densas fracturas cerradas horizontales en los primeros metros con azimuth de rumbo 125/16, con un espaciado de 45 cm y fisuras subhorizontales y subverticales, esta última abierta, con dirección 229/59 y con un espaciado de 90 cm entre ellas; típicas del intervalo II en el perfil de meteorización (Dewandel et al 2006). Estas fracturas permiten la formación de bloques sub-redondeados de 70 x 60 cm.	82
Figura 32: fotografías a) Estación 27 zona 2 roca Granodiorítica (coordenadas X: 1.118.534, Y: 1.1270.156 y Z: 2.345), b) estación 29 roca Diorita/ Tonalita (coordenadas X: 1.117,616 Y: 1.269.168 y Z: 2191) y c) estación 47 (coordenadas X: 1.116.141, Y: 1.269.811 y Z: 1743). En la Estación 27 zona 2 se observan algunas fracturas abiertas y la presencia de algunos nódulos o cascarones; típicos del Intervalo III del perfil de meteorización. (Dewandel et al 2006).	83
Figura 33: Estación 27 Zona 1 (coordenadas X: 1.118.534, Y: 1.1270.156 y Z: 2.345) y 36 sección 1 (coordenadas X: 1.113., 885 Y: 1.1269.489 y Z: 1.393), representan al intervalo IV de meteorización de roca Ígnea. En la estación 27 zona 1, presenta mayor densidad de fracturas que la zona 2 del mismo afloramiento, la estación 36 sección 1 presenta fuerte diaclasamiento y bloques de 5 - 10 cm y menores de 5 cm.	84

Figura 34: Estación 32 (coordenadas X: 1.117.393, Y: 1.1267.346 y Z: 1.929), Intervalo de meteorización V en el perfil de roca Granodiorítica, se observan cárcavas de erosión y algunas venas de cuarzo fracturadas, no se observan planos de diaclasas definidos además se ha perdido la coloración de la roca original.85

Figura 35: Fotografías a) Estación 23 (coordenadas X: 1.117.583 Y: 1.1268.092 y Z: 2.098), y b) estación 36 sección 3 (coordenadas X: 1.113., 885 Y: 1.1269.489 y Z: 1.393), La estación 23: Intervalo de meteorización VI en el perfil de roca Granodiorítica, no presenta familias de diaclasas, ni bloques o cascarones además ya se ha perdido la coloración de la roca original, en la estación 36 sección 3, no se observan bloques, pero si minerales dentro de una matriz arcillosa, se siente húmedo al tacto.86

Figura 36: Transición de cada uno de los intervalos de meteorización, mediante propiedades físicas, tanto para el Perfil Granodiorítico como para el perfil Néisico.89

Figura 37: Columna generalizada del perfil de roca Néisica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Planos de foliación, bandas composicionales y fracturas en menor proporción, Intervalo II: incremento en la densidad de fracturas, Intervalos III: Bandas composicionales plegadas, Intervalo IV: Presencia de bloques sub-angulares y redondeados, Intervalo V: Granos de cuarzo en una matriz arcillosa e Intervalo VI: Materia orgánica, galerías y restos vegetales.....91

Figura 38: Columna generalizada del perfil de roca Granodiorítica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Altamente diaclasado, Intervalo II: Fisuras Sub-horizontales y sub-verticales en mayor densidad, Intervalos III: presencia de fracturas esferoidales (cascarones o nódulos), Intervalo IV: la densidad de bloques y/o cascarones disminuye con respecto al intervalo III de meteorización, Intervalo V:

Algunas venas de Cuarzo se conservan pero éstas están altamente fracturadas e Intervalo VI: los minerales se encuentran en una matriz de grano fino.....	92
Figura 39: Curva Granulométrica perfil Granodiorítico.....	93
Figura 40: Curva Granulométrica perfil néisico	95
Figura 41: Diagrama de barras para el porcentaje de humedad relativa a) Perfil de roca néisico b) Perfil de roca Granodiorítico.	98
Figura 42: Fotomicrografías orientadas (el Norte es indicado por la flecha roja) a 2,5x de las rocas metamórficas; a la izquierda nicoles paralelos, a la derecha nicoles cruzados. (a) y (b) Intervalo I, ausencia de fracturamiento y textura Lepidogranoblástica, La silimanita se observa en este intervalo, en granos de cuarzo se observó aplastamiento. (c) y (d) Intervalo II, Aparecen Granos de Granate y fábrica apretada debido a la influencia de metamorfismo dinámico. (e) y (f) Intervalo III, levemente alterada a Epidota y a Sericita, con microfracturas que atraviesan la roca, así como otras en el espacio intergranular.	101
Figura 43: Fotomicrografías orientadas (el Norte es indicado por la flecha roja) a 2,5x en nicoles paralelos y cruzados de las rocas metamórficas analizadas mediante petrografía (a) y (b) Intervalo IV, textura Lepidogranoblástica y que a medida que aumenta la meteorización ésta desaparece. (e) y (f) Intervalo VI, alteración química de minerales y el aumento del micro-fracturamiento.	102
Figura 44: Fotomicrografías orientadas (la flecha roja en la esquina superior derecha apunta hacia el norte) a 2,5x en nicoles paralelos. Litología Granodiorítica (a) y (b) Intervalo I: Roca sin fracturamiento, (c) y (d) Intervalo II: aparición de microfracturas que atraviesan la roca, (e) y (f) Intervalo III: alteración de plagioclasas a Sericita indicando procesos de alteración hidrotermal o interacción fluido roca, y la subsecuente disolución de éstas generando una porosidad secundaria adicional.	106

Figura 45: Fotomicrografías orientadas (la flecha roja en la esquina superior derecha apunta hacia el norte) a 2,5x en nicoles paralelos de las rocas ígneas presentes en el área de estudio. (a) y (b), (c) y (d), (e) y (f) se observa una estructura masiva y fracturamiento, además de disolución de plagioclasas (a) y (b).107

Figura 46: Imágenes SEM del perfil de meteorización. (A) Caolinita (Kln) exfoliada. (B) Esméctica (Sme). (C). Microfábrica en “panal de abejas” (D) Alteración química de granos de Plagioclasa (Albita la cual se identificó mediante análisis de Difracción de rayos X DRX) (E) Mineral de morfología en estrella (Star).110

Figura 47: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, intervalo II. (A) Fracturas paralelas, en una escala de 200 micras. (B) Disolución de plagioclasas, posiblemente Albita por la cantidad de Na además de la presencia de micro-vetillas (C). Alteración química de granos de Plagioclasa. (D) Exfoliación de la Biotita.111

Figura 48: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, Intervalo III. (A) Microfábrica en “panal de abejas” (B) Granos de Plagioclasa (Pl) recubiertos por Óxidos de Fe (Ox. Fe) (C) cúmulos de haloisita (Hlo) que crecen en un grano de feldespato.112

Figura 49: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, Intervalo IV. (A) Microfracturas presentes en granos de Plagioclasa (Albita- Ab) (B) Caolinita (Kln) Exfoliada. (C) Exfoliación de la biotita (Bt) parcialmente reemplazada por algunos óxidos de Hierro (Fe) (D) Estructura. (E) Illita (Ill). (F) Argilificación (neo-formación de minerales arcilla).112

Figura 50: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, intervalo V. (A) Alteración química caracterizada por granos de feldespato (Fsd). (B) Microfracturas. (C) alteración química de granos de feldespato (Fsd) recubierto por una Microfábrica. (D) Microfábrica en “panal de abejas”.113

Figura 51: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, intervalo VI. (A) Caolinita (Kln) Exfoliada o En forma de libro. (B). Argilificación (minerales arcilla neo-formados) (C) Illita (Ill), la cual se incluye en el grupo de las micas, el reporte de microanálisis presenta picos de Al, Fe, Mg y Ti (D) Microfracturas en granos de Feldespato (Fds).....	114
Figura 52: Imágenes SEM del Mineral de morfología Tubular (Tub), que crece de manera orientada y ordenada.	115
Figura 53: Imágenes SEM (A) Zircón (Zr) (B) Textura tubular (Tub) (C) Alteración química de cristales de Apatito (Ap) (D) Cuarzo (Qz) sin alteración química y sin minerales de alteración alrededor. (E) Caolinita (Kln) exfoliada (F) Caolinita exfoliada (G) Cuarzo recubierto con óxidos de Fe y Mg. (H) Disolución mineral.	116
Figura 54: Imágenes SEM (A) Alteración química en granos de Plagioclasa (Albita-Ab, mineral identificado mediante análisis de Difracción de Rayos X, DRX.) (B) Mineral Tubular (Tub) que crece en las caras o superficies de otros minerales. .	117
Figura 55: (A) Alteración química de granos de Feldespato, (Microclina- Mc, mineral identificado mediante análisis de Difracción de Rayos X, DRX) con el EDS se observan concentraciones de elementos de tierras raras. (B) Caolinita Exfoliada (C) Mineral de morfología Tubular, presenta altos picos en Al, K, Mg, Na, Fe y Ti. .	117
Figura 56: Imágenes SEM del intervalo de meteorización (A) Caolinita (Kln) exfoliada (B) Alteración química en granos de Plagioclasa (Pl). (C) Mineral de morfología Tubular (Tub). (D) Alteración química en granos de Plagioclasa.....	118
Figura 57: Imágenes SEM del intervalo de meteorización (A) Caolinita (Kln) exfoliada (B) Alteración química en granos de Plagioclasa (Pl). (C) Matriz-Caolinita.	119
Figura 58: Perdidas por Ignición (L.O.I)	121

Figura 60: % Contenido de Óxidos Mayores, Perfil Néisico.....	122
Figura 61: Diagramas de Variación para el perfil de Roca Granodiorítica.	125
Figura 62: Diagramas de Variación para el perfil de Roca Néisica.	127
Figura 63: Relación de Ruxton (R).....	128
Figura 64: Índice de Alteración Química (CIA).....	130
Figura 65: Porcentaje de porosidad efectiva.....	135
Figura 67: Recopilación de los resultados obtenidos a partir de las pruebas físico químicas aplicadas a las muestras recolectadas para el perfil de roca Granodiorítica.	142
Figura 68: Relación entre clima y meteorización, tomado de González (2002) ...	144
Figura 69: Porcentajes del tamaño de grano en los intervalos IV (Altamente meteorizado), V (Roca completamente meteorizada) y VI (Suelo residual) y su relación con el calibrado.	146
Figura 70: Relación entre clima y meteorización, tomado de González (2002). ..	148

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Formato de campo, utilizado para describir cada uno de los afloramientos.

Anexo B. Mapa Geológico del área de estudio: Microcuencas del Rio Lato y Rio Oro Alto a escala 1:10.000

Anexo C. Mapa de estaciones y vías de acceso del área de estudio: Microcuencas del Rio Lato y Rio Oro Alto a escala 1:10.000

Anexo D. Informes de Fluorescencia de rayos X.

Anexo E. Tabla de resultados prueba de porosidad mediante el Porosímetro de Helio.

Anexo F. ubicación de las muestras de mano mediante sus propiedades físicas observadas en cada uno de los intervalos de meteorización roca metamórfica.

Anexo G. ubicación de las muestras de mano mediante sus propiedades físicas observadas en cada uno de los intervalos de meteorización roca ígnea.

Anexo H. Transición de los intervalos de meteorización mediante las características observadas en afloramientos de roca metamórfica.

Anexo I. Transición de los intervalos de meteorización mediante las características observadas en afloramientos de roca ígnea.

RESUMEN

TITULO: CONTRIBUCIÓN EN LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PERFILES DE METEORIZACIÓN DE ROCAS CRISTALINAS, EXPUESTOS AL ORIENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA*.

AUTORAS: FORERO Maria Camila., FUENTES María Alejandra**.

PALABRAS CLAVES: Meteorización, Macizo de Santander, Hidrogeología, Rocas cristalinas. Acuíferos.

Los textos tradicionales en hidrogeología atribuyen a los sistemas subterráneos de rocas cristalinas como reservorios con bajas cualidades cuando conservan su estado original de formación, sin embargo, se reconoce que esta condición puede variar de acuerdo a transformaciones producto de procesos de deformación frágil o por acción de procesos químicos estimulados por climas primordialmente húmedos y templados; recientemente se han consolidado modelos conceptuales de la meteorización en rocas cristalinas promoviendo un cambio conceptual donde el potencial hidrogeológico no es limitado por cierto tipo de rocas sino que incluyen a las cristalinas.

El área de estudio se localiza al Este del área metropolitana de Bucaramanga, Macizo de Santander, conformado por una superficie amplia de rocas cristalinas que presentan fracturamiento y diaclasamiento debido a procesos tectónicos, erosivos y de meteorización, generando condiciones que facilitan el flujo de agua y su vez pueden optimizar los procesos de meteorización en la región. En el proceso de mejorar el conocimiento del potencial hidrogeológico de las zonas meteorizadas dentro del macizo de Santander, se recurre a la identificación y localización de perfiles de meteorización sobre los cuales se realiza inicialmente un estudio detallado de afloramientos en campo, en los cuales se identificaron y cartografiaron Rocas ígneas y metamórficas; a partir de las cuales se tomaron muestra para llevar a cabo los respectivos análisis macroscópicos, petrográficos y geoquímicos. Para ello se recurrió a Láminas delgadas, determinación del porcentaje de porosidad, Humedad, Peso unitario seco, Fluorescencia de rayos X, Microscopía electrónica de Barrido y Granulometría; con base en lo cual se caracterizan los perfiles de meteorización, y sus propiedades de retención de humedad, tamaño, forma y distribución de poros con el fin de correlacionar las características petrofísicas de los perfiles de meteorización y su relación con su importancia y funcionalidad hidrogeológica.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director Juan Diego Colegial, Codirectora Zully Gómez Isidro.

ABSTRACT

TITLE: CONTRIBUTION TO THE IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF WEATHERING PROFILES OF CRYSTALLINE ROCKS, TO EAST OF METROPOLITAN BUCARAMANGA EXPOSED*.

AUTHORS: FORERO Maria Camila., FUENTES María Alejandra**.

KEY WORDS: Weathering, Macizo de Santander., hydrogeology, crystalline rocks

Traditional texts in hydrogeology attributed to underground systems of crystalline rocks such as reservoirs with low qualities when they retain their original state of training, however, it is recognized that this condition may vary according to product of brittle deformation processes transformations or by action of chemical processes stimulated by climates primarily humid and temperate; recently been consolidated conceptual models of weathering in crystalline rocks promoting conceptual change where the hydrogeological potential is not limited by certain types of rocks but include crystalline rocks.

The study area is located to the East of the metropolitan area of Bucaramanga, Macizo de Santander, consists of a broad area of crystalline rocks exhibiting fracturing and jointing have suffered due to tectonic processes, in addition to erosion and weathering, which determines conditions to facilitate the flow of water which in turn can improve the weathering processes in the region. In the process of improving the knowledge of the hydrogeological potential areas weathered into the massif of Santander, is used to identify and locate weathering profiles over which is initially performed a detailed study of outcrops in the field, in which they identified and mapped igneous and metamorphic rocks; from rock samples which were taken to carry out the respective macroscopic, petrographic and geochemical analyzes. For this to thin films, determining the percentage of porosity, humidity, dry unit weight, X-ray Fluorescence, Scanning Electron Microscopy and Particle size was used; based on which weathering profiles, and their unique moisture retention properties, size, shape and distribution of pores in order to correlate petrophysical properties of certain areas of weathering and its relation to its importance and functionality characterize hydrogeological.

* Graduation project

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director Juan Diego Colegial. Codirector Sully Gomez Isidro.

INTRODUCCIÓN

Al oriente del área de Bucaramanga, se encuentra una franja montañosa de diferentes tipos de rocas siendo importantes las rocas cristalinas que constituyen el denominado Macizo de Santander. Históricamente las empresas que suministran agua a los municipios del área metropolitana han obtenido el recurso de estas zonas considerándolas como zonas enriquecidas en recursos hídricos. Las áreas de captación están localizadas en la cuenca de los ríos Suratá (abastece la planta de Bosconia), río Tona (abastece las plantas de La Flora y Morrórico), y río Frío (abastece la planta de Floridablanca), lugares estratégicos para el almacenamiento y aprovechamiento del agua para la población. Según reportes de la (Corporación Autónoma regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB. 2011), los recursos para el abastecimiento de agua son insuficientes para la demanda en el Área metropolitana de Bucaramanga; por tal razón es necesario el estudio pertinente para la identificación de propiedades petrofísicas de las rocas cristalinas correlacionándolas con los perfiles de meteorización y que podrían establecer la capacidad de las rocas cristalinas para permitir el flujo de agua a través de ellas y potenciales almacenamientos subterráneos del recurso hídrico.

En los estudios de rocas cristalinas meteorizadas se han definido por varios parámetros para su clasificación de acuerdo a sus autores, por ejemplo Duzgoren, Aydin & Malpas (2002), establecen índices de meteorización encontrados a partir de estudios cuantitativos en la composición química y mineralógica; Dewandel, Lachassagne, Maréchal, Wyns & Krishnamaurthy (2006), definen los estados de meteorización en cinco capas diferenciadas, dispuestas de base a techo: Basamento fresco, Capa fisurada, Capa laminada, El Saprolito (llamado también alterita o regolito) y la laterita o corteza de hierro, que corresponden de menor a mayor grado de meteorización. Adicionalmente Aristizábal, Valencia, Guerra, Vélez

& Echeverri (2011), define que los elementos más móviles durante los procesos de meteorización, siendo estos los más efectivos para la cuantificación de la meteorización química en materiales residuales heterogéneos. Por otra parte Lozano (2012), realizó en la misma zona de estudio de esta investigación un trabajo en el cual logró identificar mediante análisis petrográfico que los mayores porcentajes de humedad corresponden a los primeros intervalos de meteorización de cada perfil, además junto con las pruebas de Absorción Atómica observo la pérdida de iones, pertenecientes a los minerales de plagioclasas y feldespatos, por lo tanto al mayor intervalo de meteorización se le atribuyen colores rojizos evidencia de un incremento en oxihidroxidos de Fe.

El estudio de la caracterización de perfiles de meteorización en rocas cristalinas pertenecientes al Macizo de Santander que aquí se presenta y cuya área de estudio es al Este del área metropolitana de Bucaramanga tiene como propósito ser la base para el estudio del potencial hidrogeológico de perfiles de meteorización tanto para el Neis de Bucaramanga y El Complejo Plutónico de Santander, rocas metamórficas e ígneas respectivamente. Esta caracterización tiene en cuenta los dos procesos de meteorización que se llevan a cabo, el primer proceso es físico o mecánico y el segundo es químico o de alteración que involucran la desintegración y la descomposición in situ de la roca, respectivamente (Spalletti, 2007). Para ello se realizaron diferentes análisis físicos, petrográficos y geoquímicos, recurriendo a Láminas delgadas, determinación del porcentaje de porosidad, Humedad, Peso unitario seco, Fluorescencia de rayos X, Difracción de rayos X, Microscopia electrónica de Barrido y Granulometría. Con el presente trabajo se busca dar la base en perfiles de meteorización con implicaciones hidrogeológicas en rocas cristalinas para estudios posteriores que promuevan un cambio conceptual donde el potencial hidrogeológico despierte un interés primordial para el abastecimiento de agua subterránea en este tipo de Rocas (Dewandel et al., 2006).

Además de aportar a los estudios que viene realizando el Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) en la zona, y que pretende establecer características de estas rocas como acuíferos y evaluar a futuro metodologías para la gestión del recurso hídrico del Área metropolitana de Bucaramanga.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Describir perfiles de meteorización de rocas cristalinas expuestos en el Macizo de Santander al oriente del área metropolitana de Bucaramanga e interpretación de análisis geoquímicos y petrográficos de niveles diferenciables del perfil de meteorización con el fin de distinguir propiedades hidrogeológicas de estos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- o Realizar Cartografía geológica de detalle a escala 1:10.000 en un sector de la microcuenca del río Lato/ Hato y del río de Oro Alto, Municipio de Piedecuesta.
- o Identificar perfiles de meteorización en rocas ígneas y metamórficas con diferenciación de intervalos más completos.
- o Establecer espesores aproximados de cada uno de los intervalos de meteorización para desarrollar una columna generalizada de cada perfil.
- o Realizar caracterización litológica y diferenciación petrográfica a nivel macroscópico para determinar cambios de coloración y de porcentajes de minerales arcilla y óxidos en muestras que representan los diferentes estados de meteorización.
- o Realizar caracterización litológica y diferenciación petrográfica a nivel microscópico para análisis de minerales de alteración, microfracturas, lineamientos y conteo de porosidad en muestras que representan los diferentes estados de meteorización.

- Realizar análisis granulométrico, en muestras que representan los diferentes estados de meteorización del perfil de roca ígnea y metamórfica, para definir el proceso físico o mecánico que han sufrido estos.
- Realizar microscopía electrónica de barrido (SEM) con el fin de identificar los minerales arcilla que se desarrollan durante el perfil de meteorización para roca ígnea (Roca Granodiorítico) y metamórfica (Neis Cuarzo Feldespato).
- Clasificar los tipos de alteración o meteorización sufridos por rocas metamórficas e ígneas e identificar su evolución mineralógica, utilizando diferentes técnicas analíticas geoquímicas y sistemas de clasificación o índices de alteración y meteorización química: Ruxton, CIA y otros.
- Determinación de características hidrogeológicas de los intervalos de meteorización con base en ensayos de humedad y peso unitario seco, microfracturas y análisis de porosidad en cada estadio de la meteorización.

2. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación busca contribuir a la construcción de parámetros que establezcan la potencialidad acuífera de las rocas cristalinas del macizo de Santander, teniendo en cuenta los cambios físicos, químicos y mineralógicos causados por la meteorización, proceso acelerado por el clima húmedo y temperado en el área de estudio.

Desde el punto de vista ambiental y de recursos hídricos el macizo de Santander es de gran importancia, los recursos hídricos que proveen a los municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga provienen de la zona montañosa al oriente de estos; y solo tres cuencas son usadas por parte de las entidades encargadas de acueductos para el consumo humano, siendo insuficiente por el aumento progresivo de la población, lo que lleva a la necesidad de aumentar el abastecimiento del recurso hídrico a medida que va creciendo¹, por lo tanto el agua subterránea podría ser un potencial hídrico representativo para el área metropolitana de Bucaramanga y sin embargo no se ha estudiado con detenimiento para el macizo de Santander.

Por otra parte en el año 2000 el Acueducto metropolitano de Bucaramanga realizó exploraciones exhaustivas en el Abanico Aluvial el cual se consideró que no era una fuente importante de abastecimiento de agua por su bajo caudal de tan solo 8,14 litros/segundo²; dejando de lado el potencial hídrico que podría tener el macizo de Santander ya que es el lugar donde se recargan las mayores fuentes superficiales del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Esta investigación orientada hacia la identificación de perfiles de Meteorización ampliará el estudio sobre las rutas de infiltración, flujo y almacenamiento de agua en las rocas cristalinas presentes en el macizo de Santander; para ello, se realizó

¹ Tomado de: <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=91>. Sábado 22 de junio de 2013.

² Tomado de: <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=91>. Lunes 10 de Febrero de 2014

el análisis de datos arrojados en este estudio mediante Pruebas de Humedad y Peso unitario Seco, Secciones Delgadas, Microscopia Electrónica de Barrido, porosidad, aparición de minerales arcilla y de alteración y Fluorescencia de Rayos X.

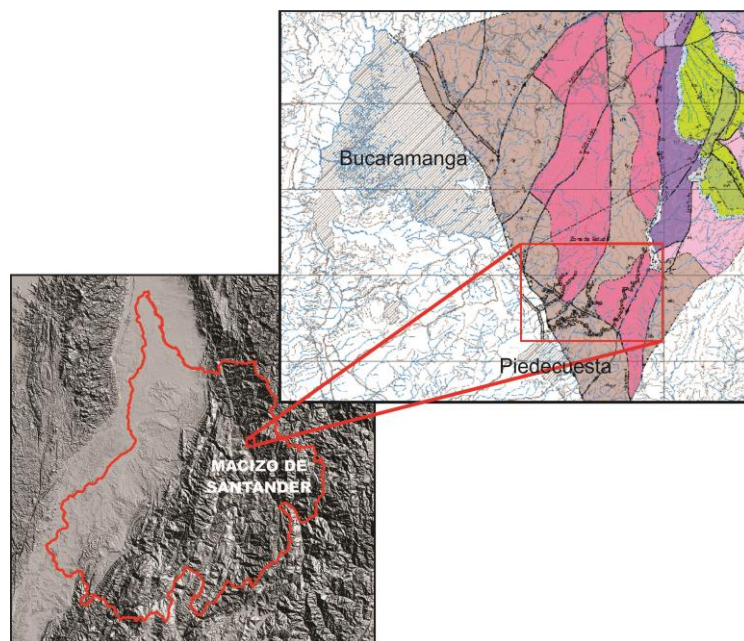
Se tendrá énfasis en la descripción de cada uno de los intervalos de meteorización dentro del perfil Ígneo y metamórfico con los cuales se podrá identificar las características petrofísicas y geoquímicas y su relación con su importancia y funcionalidad hidrogeológica.

3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.

La microcuenca del río Hato/Lato y microcuenca del río de Oro Alto, contiguas se encuentran en el municipio de Piedecuesta en el sector sur oriental del área metropolitana de Bucaramanga, correspondiente a las planchas 120-II-B-4 y 120-II-D-2 escalas 1:10.000 del sistema cartográfico del Instituto Geográfico Colombiano Agustín Codazzi.

El presente estudio se centra en la microcuenca del río el Hato o Lato y en un sector más pequeño la microcuenca del río de Oro Alto, que pertenecen a su vez a la subcuenca del Río de Oro y este pertenece a la cuenca del Río Lebrija (Figura 5: ver sección 1.3.4 Hidrografía) esta se encuentra delimitada por las coordenadas: X1: 1.113.000, Y1: 1.266.000, X2: 1.119.000, Y2: 1.272.000, (Figura 1) con una altura sobre el nivel del mar que va desde los 1139 m hasta 2416 m y un área de 36 Km².

Figura 1: Mapa de localización del área de estudio, ubicación en el departamento de Santander.

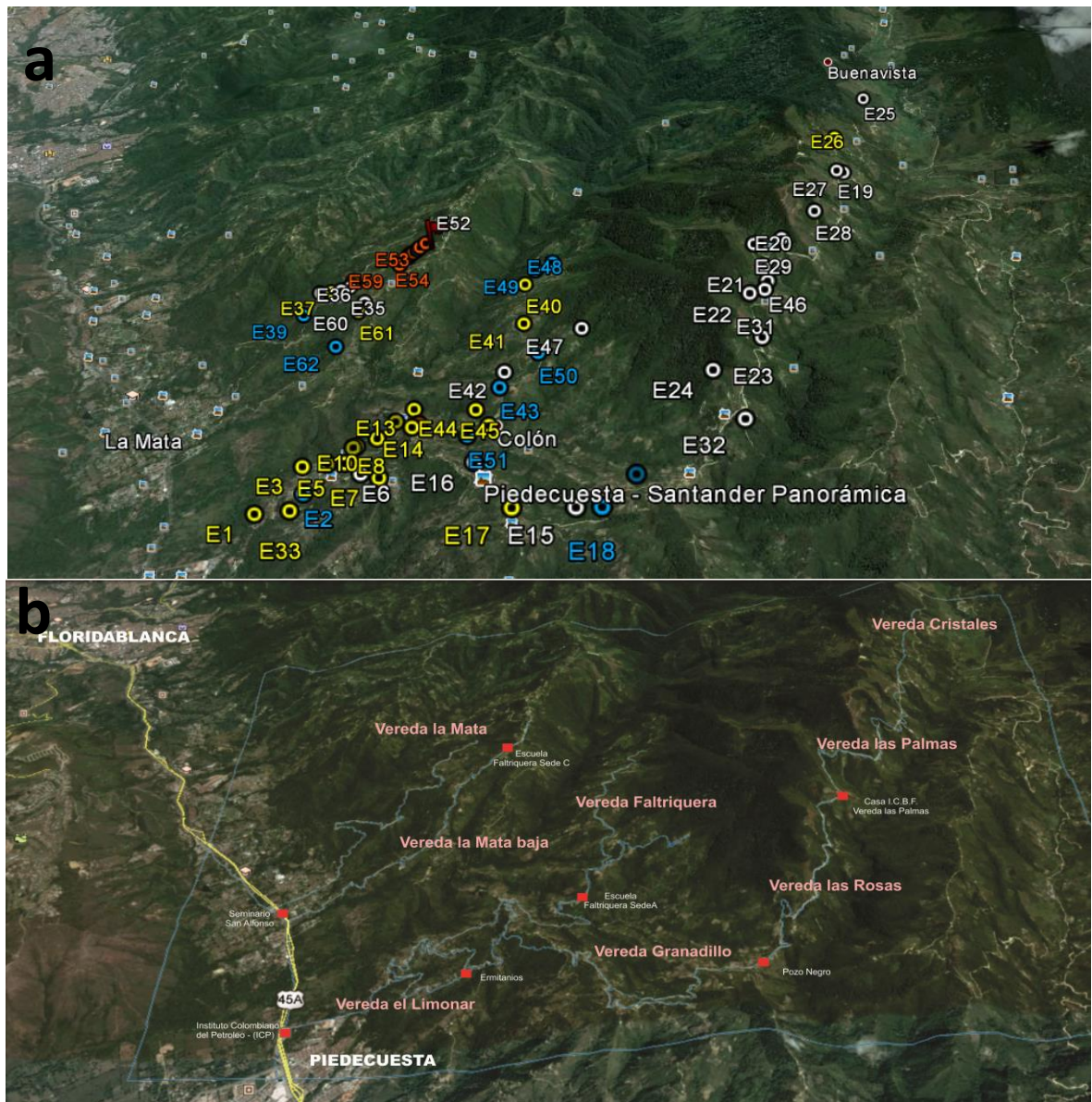


Fuente: Global Mapper, 2014. Modificado por los autores.

3.1 VÍAS DE ACCESO.

En el área de estudio encontramos las veredas: Granadillo, Las Palmas, Pozo Negro, Cristales, La Mata, Las Rosas y Faltriquera. Los afloramientos que conforman tanto al perfil de meteorización de roca metamórfica como el perfil de meteorización de roca Ígnea, (figura 2.a) se encuentran ubicados en una sección del Carreteable: ICP (Instituto Colombiano del Petróleo) - Vereda Pozo Negro (Figura 2.b) para el perfil de meteorización metamórfico que se desprende de la autopista Piedecuesta–Bucaramanga, el cual corta topográficamente al Neis de Bucaramanga, así mismo los afloramientos que representan el perfil de roca Ígnea pertenecen al Carreteable: Pozo Negro – Vereda Cristales. (Figura 2.b).

Figura 2: a) La imagen representa los afloramientos que conforman ambos perfiles de meteorización, las estaciones de color amarillo indican litologías Metamórfica, las de color blanco litologías Ígneas, las de color azul indican intrusión de roca ígnea en roca metamórfica y las de color naranja representan un horizonte de Suelo Residual b) la zona de estudio delimitada en color azul, en donde se muestran los Carreteables utilizados para la identificación de las diferentes litologías el Carreteable: ICP - Vereda Pozo Negro (roca metamórfica), Carreteable: Pozo Negro – Vereda Cristales (rocas ígneas) y Suelo Residual ubicados en la Vereda la Mata Baja.

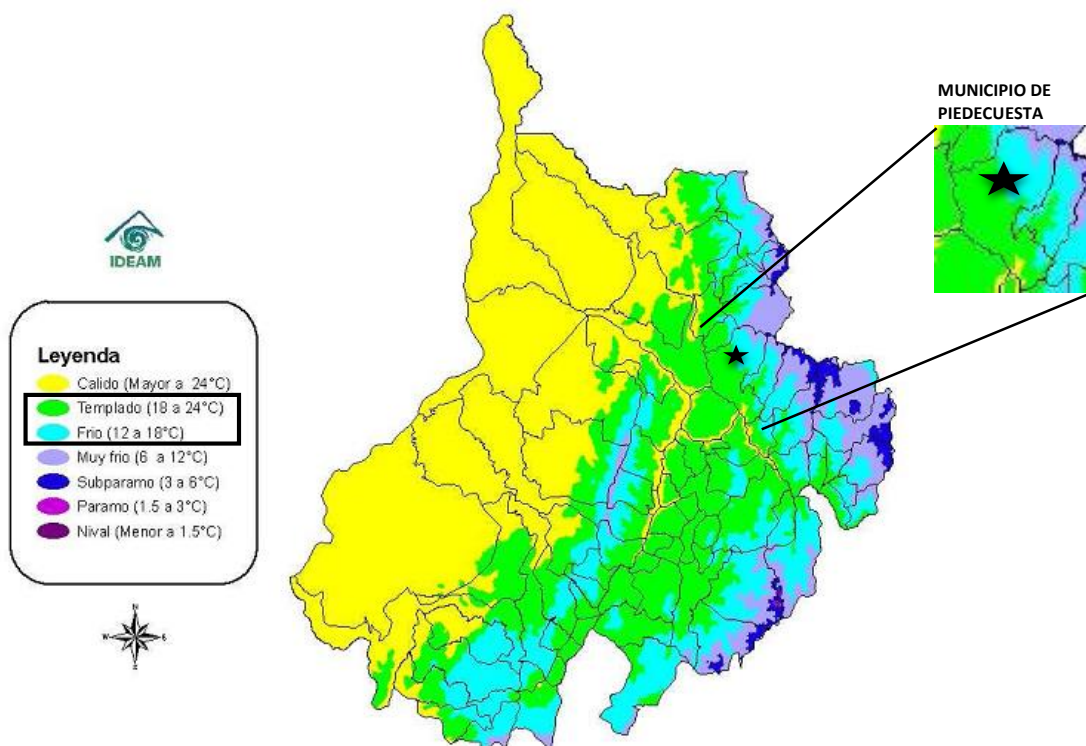


3.2 ASPECTOS ATMOSFÉRICOS Y CLIMÁTICOS

El presente trabajo de investigación, como ya se ha mencionado anteriormente será la base para posteriores estudios hidrogeológicos en rocas cristalinas teniendo en cuenta el papel que juega la meteorización en este tipo de rocas de esta zona, por lo tanto es necesario relacionar aspectos climáticos y atmosféricos de la microcuenca del Rio Lato/Hato y la microcuenca del rio de Oro Alto, mostrando datos puntuales del área de estudio, con una altura sobre el nivel del mar que va desde los 1139 m hasta 2416 m, comprendiendo 2 pisos térmicos. (Figura 3).

- Piso térmico medio o Templado: Altitudes comprendidas entre 1000 y 2000 m sobre el nivel del mar con temperaturas de 18°C a 24°C. Registrándose para este piso térmico, cuatro condiciones de humedad: seca, húmeda, muy húmeda y pluvial.
- Piso térmico Frío: Altitudes comprendidas entre 2000 y 3000 m sobre el nivel del mar con temperaturas entre 12°C y 18°C. Registrándose para este piso térmico, tres condiciones de humedad: seca, húmeda y muy húmeda. (Grupo de Investigación sobre desarrollo Regional y Ordenamiento Territorial, GIDROT, 2011).

Figura 3: Temperatura media anual (°C). La estrella representa el área de estudio, en el municipio de Piedecuesta. Santander, mostrando las correspondientes temperaturas según el piso térmico: Templado y Frío.



Fuente. GIDROT (2011). Modificado por los autores.

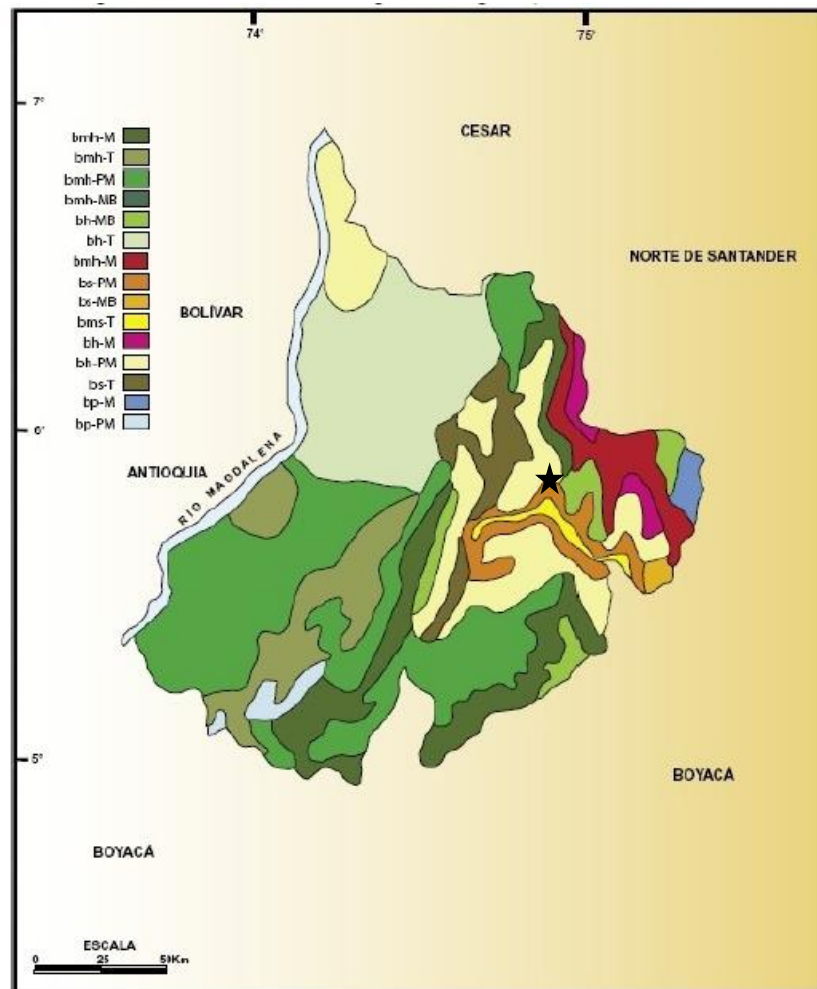
3.3 VEGETACIÓN.

La vegetación de Bosque Húmedo Premontano (bh-PM), es característico de altitudes de 1000-2000 msnm en clima medio o Templado. (Figura 4). Esta vegetación se encuentra intervenida en un alto porcentaje, sin embargo aún se conservan Bosques con árboles de 20 a 25 m de altura y diámetro entre 60 y 80 cm, que está al cuidado de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

Entre las especies vegetales dominantes se encuentran las siguientes: roble (*Quercus humboldtii*), cedro (*Cedrela* sp), carbonero (*Albizia carbonaria*), guamo (*Inga* sp), caracolí (*Anacardium excelsum*), ceiba (*Ceiba pentandra*), moho (*Cordia*

sp), guásimo (*Luehea semanni*), pata de vaca (*Bauhinia* sp), sauce (*Salix* sp), aguacate (*Persea* sp), cucharo (*Rapanea* sp), trompeto (*Boconia* sp), pino de pacho (*Najeia rospiiegliossii*), nacedero (*Trinchantera gigantea*) y guayabo (*Psidium* sp).

Figura 4: Zonas de vida según Holdridge, departamento de Santander. La estrella representa el área de estudio.



Fuente. GIDROT (2011). Modificado por los autores.

3.4 HIDROGRAFÍA

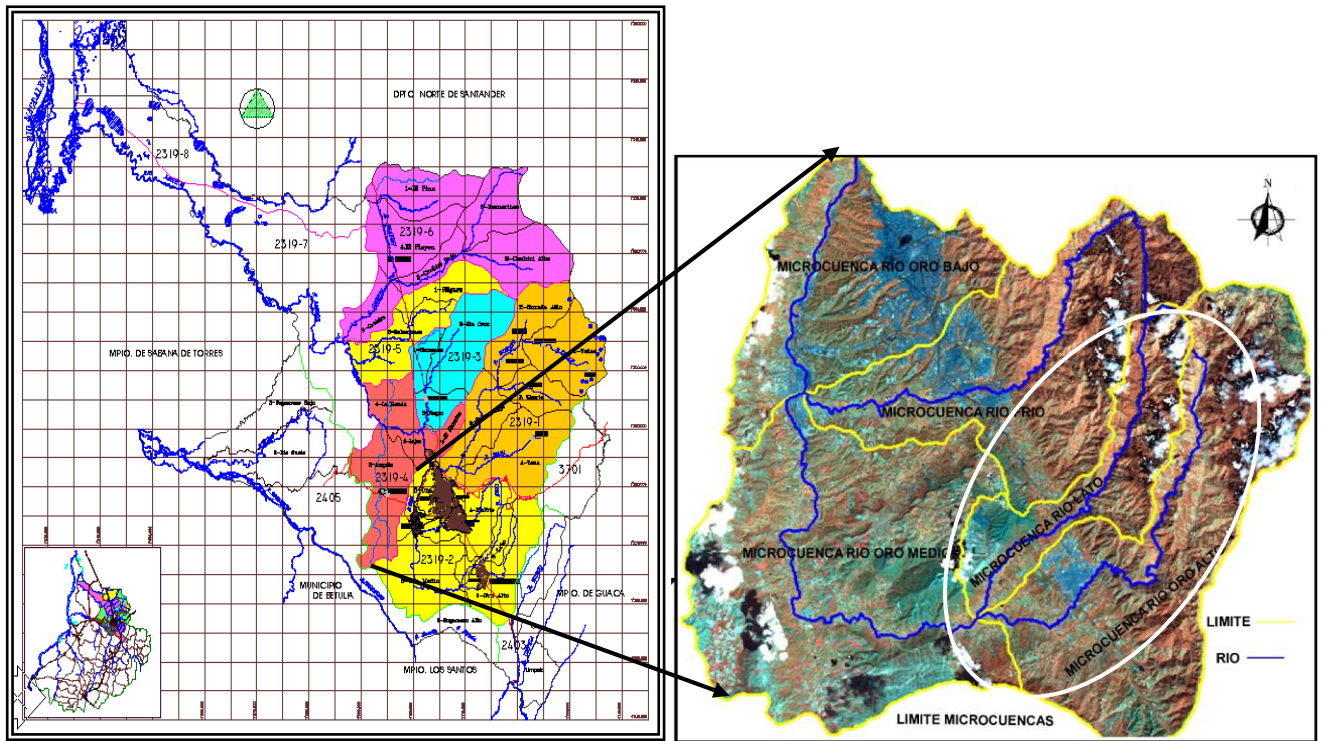
Se entiende por cuenca Hidrografía a las aguas superficiales que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales de caudal continuo e intermitente, que confluyen en un curso mayor, que a su vez, desemboca en un río principal, en un pantano, en un lago o directamente en el mar. (Castellanos y Cetina, 2013).

La cuenca superior del Río Lebrija, la cual es uno de los principales componentes Hidrográficos del Departamento de Santander; nace al noreste del municipio de Piedecuesta y desemboca en el río Magdalena, con una extensión de 879.000 ha, de las cuales el 54%, o sea 474.660 ha corresponden al departamento de Santander y el 46% restante al departamento del Cesar. En la zona alta de su nacimiento el río avanza en dirección noreste, regando con las aguas de sus afluentes el valle de Piedecuesta para luego tomar hacia el norte al pasar por la meseta de Bucaramanga, donde toma el nombre de río de Oro. Al recibir las aguas de la subcuenca del río Surata compuesta por los ríos Frío y Tona, en las depresiones finales de la meseta de Bucaramanga, se configura el río Lebrija propiamente dicho. (GIDROT. 2011).

La cuenca del río Lebrija está conformada por ocho subcuencas; (Figura 5) dentro de las cuales se encuentra la subcuenca del Río de Oro, conformada a su vez por cinco microcuencas en manejo y administración de la CDMB, las cuales se denominan Microcuenca Oro Alto, Microcuenca Oro Medio, Microcuenca Oro Bajo, Microcuenca Río Lato y Microcuenca Río Frío (Figura 6). (CDMB. 2007).

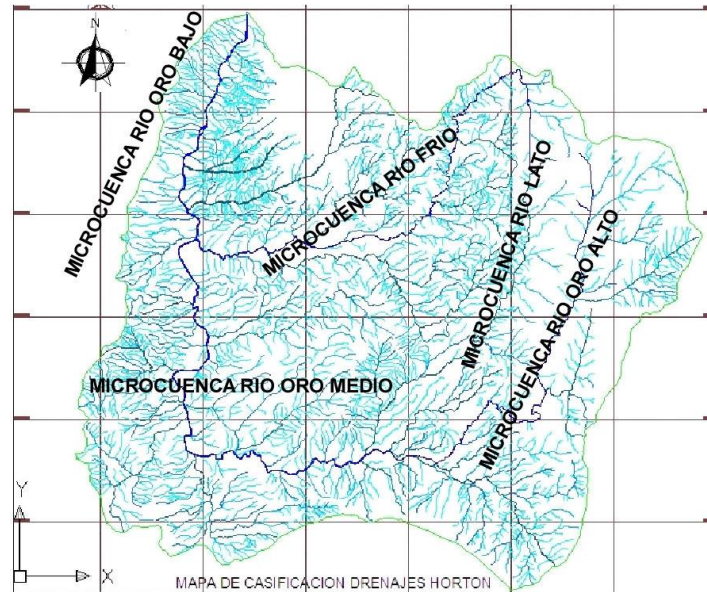
La zona de estudio abarca en mayor extensión a la Microcuenca del Río Lato, cuya red hídrica principal la conforma el Río Lato, con un área de 51 Km² y la microcuenca Oro Alto con un área de 142 Km² se clasifican como Ovaladas a rectangular oblonga (elíptico), presentan baja susceptibilidad a crecidas y tipo de drenaje, rectangular. (CDMB. 2007).

Figura 5: La imagen de la izquierda representa la Cuenca superior del Río Lebrija identificada por el Ideam con el código 2319 y sus ocho subcuencas (Jurisdicción otorgada por la CDMB), parte Nororiental del departamento de Santander, la Subcuenca del Río de Oro se representa con el color amarillo (parte inferior) y la delimitación de color Blanco demarca las microcuenca del Río Lato/Hato y Oro Alto (imagen derecha).



Fuente. CDMB, 2007. Modificado por los autores.

Figura 6: Hidrografía de la Subcuenca del Río de Oro, conformada por las Microcuenca Oro Alto, Microcuenca Oro Medio, Microcuenca Oro Bajo, Microcuenca Río Lato y Microcuenca Río Frío.



Fuente. CDMB, 2007. Modificado por los autores.

3.5 PRECIPITACIÓN

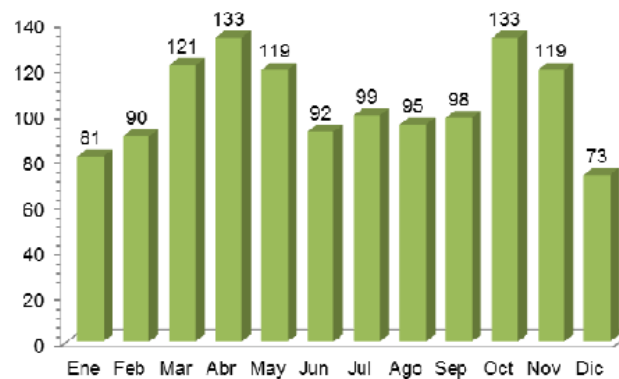
La precipitación juega un papel protagónico en el ciclo hidrológico de una región, en el departamento de Santander ésta es de carácter bimodal, es decir presenta dos periodos de lluvia y dos periodos secos intercalados, durante el año. Los meses más lluviosos, en el primer periodo Abril y Mayo, en el segundo periodo son Octubre y Noviembre (Figura 7).

La precipitación promedio de la unidad Hídrica quebrada el Rasgón (correspondiente a la microcuenca Oro Alto en donde se registran los afloramientos del perfil de meteorización de roca ígnea) es de 1250 mm y cuya estación climática de la CDMB el Rasgón reporta una temperatura media de 16.8 °C.

La precipitación promedio de la unidad Hídrica Lato Bajo (correspondiente a la microcuenca Lato en donde se registran los afloramientos del perfil de

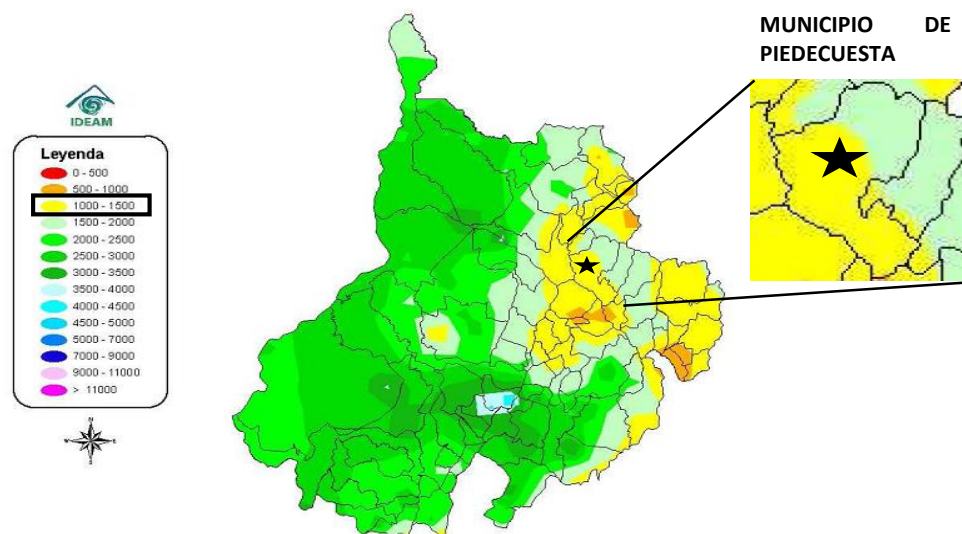
meteorización de roca metamórfica, características observadas mediante el mapa geológico) es de 1400 mm y cuya estación climática UIS del IDEAM reporta una temperatura media de 23 °C. (Tomado y modificado: CDMB, 2007).

Figura 7: Precipitación promedio mensual (mm). Los datos fueron recolectados en la Estación de la Universidad Industrial de Santander, a una elevación de 1018 msnm, Longitud: -73.10 y Latitud: 7.13.



Fuente. Moreno (2010). Modificado por los autores.

Figura 8: Precipitación total anual (mm). La estrella representa el área de estudio, en el municipio de Piedecuesta. Santander.



Fuente. GIDROT (2011). Modificado por los autores.

4. METODOLOGÍA

Para el presente trabajo la metodología que se aplicó corresponde a 6 fases, desarrolladas de manera programática para la obtención de buenos resultados.

4.1 FASE 1: DOCUMENTACIÓN

Consulta bibliográfica de artículos en donde se relacionen temas con el objeto de la investigación, así como la consulta de mapas y estudios geológicos realizados con anterioridad en la zona; este recurso bibliográfico fue tomado de las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander y la Universidad Nacional de Bogotá, junto con la consulta en revistas publicadas por estas universidades; adicionalmente se aprovechó el recurso bibliográfico otorgado por el Director de este proyecto.

4.2 FASE 2: RECONOCIMIENTO DE CAMPO Y DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Primera salida de campo con el fin de reconocer el área de estudio en compañía del director del trabajo de grado, para identificar rutas de acceso, localización y geo-referenciación de afloramientos apropiados para la descripción de los perfiles de meteorización.

4.3 FASE 3: RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO

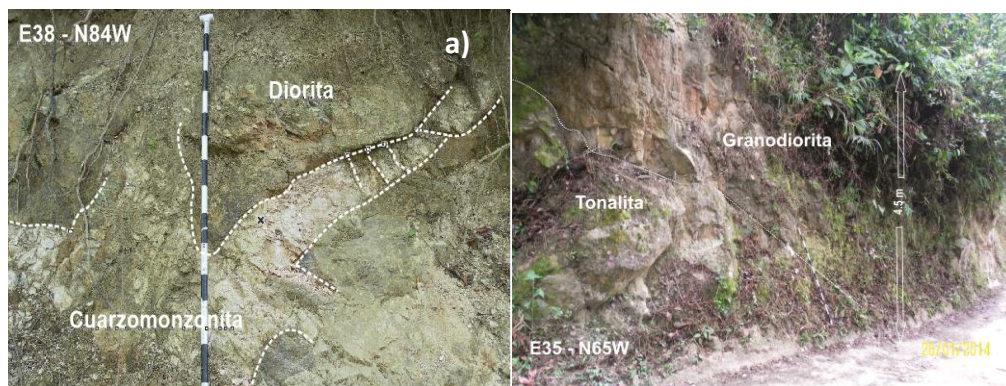
Segunda salida de campo con objetivo de:

- Recolección de datos: se utilizó un formato (Anexo A) para el registro de los datos y características encontradas en cada afloramiento, entre estas está, n° de estación, fecha, localización, coordenadas, esquema, descripción afloramiento, espaciado entre fracturas, relleno de fracturas, dimensiones, vegetación, presencia de bloques (tamaño y redondez), color, materia

orgánica, oxidación, terreno compactado o disgregado, datos estructurales (foto y orientación), foto afloramiento y orientación, descripción de las muestras recolectadas (tamaño de grano, redondez, esfericidad, matriz, color y protolito), composición mineralógica, numero de muestra y objetivo de la muestra recolectada.

- Identificación y cartografía de las litologías encontradas en el área de estudio (Rocas ígneas y metamórficas) a escala 1:10.000 con ayuda del mapa geológico H12 a escala 1:100.000 (Ward et al., 1977) y el mapa litoestructural de la cuenca del río Lato a escala 1:25.000 generado por Caballero (1995). Anexo B.

Figura 9: Diferenciación litológica de los afloramientos para cartografía de detalle. (a) Estación E38 ubicada en Vía Seminario San Alfonso - Alto de la Mata, 100 m arriba de la Finca Aurora, en la cual se observa contacto intrusivo de Cuarzomonzonita con Diorita; (b) Estación E35 situada Vía Seminario San Alfonso - Alto de la Mata, donde se observa contacto neto entre Tonalita y Granodiorita.



- Se tomaron muestras del material meteorizado orientado y no orientado para los respectivos análisis físico-químicos (Lámina delgada, Humedad y Peso unitario seco, Fluorescencia de Rayos X, Microscopia electrónica de Barrido (SEM), Granulometría y Porosidad).

Figura 10: Muestras de mano tomadas en salida de campo que representan el intervalo de meteorización observado.



- Descripción de las características macroscópicas de los niveles de roca meteorizada, (coloración, tamaño de grano, cantidad de materia orgánica, mineralogía, porcentajes de minerales arcillosos y determinación de espesores del perfil de meteorización).

Figura 11: Ejemplificación de la descripción de campo y la diferenciación del material meteorizado en el afloramiento. Estación E36 ubicada en Autopista Piedecuesta - Bucaramanga, desvió Seminario San Alfonso – Vereda la Mata, Piedecuesta.



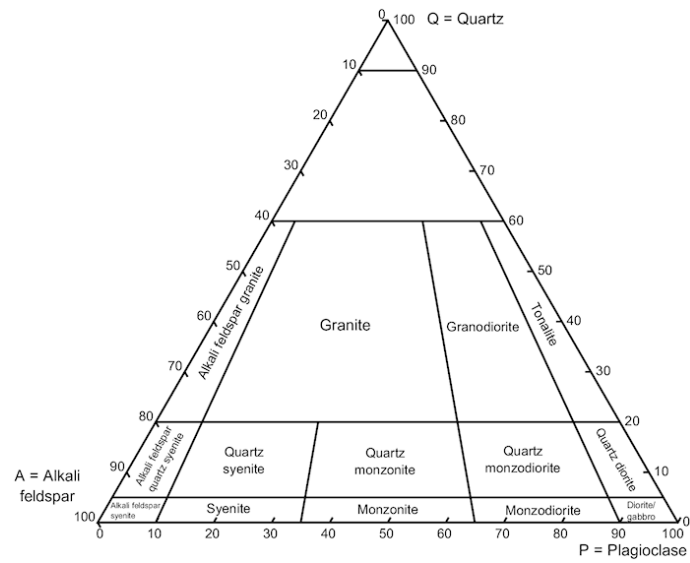
4.4 FASE 4: PRUEBAS DE LABORATORIO

Corresponde al procesamiento y al análisis de las muestras en el laboratorio, para la determinación de porosidades, litologías, tamaños de granos, contenido de metales (CaO, Na₂O, K₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃ y MgO) e identificación de minerales arcillosos; las técnicas a aplicar serán: análisis petrográfico mediante secciones delgadas, análisis granulométrico, análisis de humedad relativa, análisis de microscopía electrónica, análisis de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X y ensayos porosidad.

4.4.1 Análisis petrográfico mediante secciones delgadas. Para el proyecto se realizaron secciones delgadas y su respectivo análisis con el fin de describir y clasificar la composición mineral, las texturas y estructuras existentes y realizar la clasificación litológica de las rocas al igual que caracterizar los estadios de alteración que se presentan en la secuencia estudiada. Las secciones petrográficas elaboradas y los análisis realizados se hicieron en un microscopio de luz transmitida Leitz LABORLUZ 12 POL acoplado con oculares de 10x y aumentos de 4x, 10x y 40x; el análisis en estas muestras, consistió de la determinación del tipo de roca teniendo en cuenta aspectos estructurales y texturales. Una vez determinado el tipo de roca, se procedió a establecer la composición mineralógica y su respectivo porcentaje con base en las propiedades ópticas exhibidas bajo nicoles cruzados o paralelos; en este proceso la sección delgada fue dividida en una malla de 150 puntos a lo largo de las líneas N-S y E-W, la identificación mineralógica se hizo en la intersección de estas dos líneas. La toma de las fotomicrografías (las cuales son orientadas) se hizo utilizando un microscopio petrográfico de luz transmitida Nikon ECLIPSE LV 100 POL con un objetivo de 2.5x y una cámara digital Nikon DS-Ri1.

La clasificación de las rocas ígneas se hizo utilizando los diagramas QAPF, encontrados en la guía de Laboratorio de Petrología Ígnea (Mantilla, 2003) (Figura 12); el análisis de las rocas metamórficas se hizo con base en los trabajos de Yardley et al., (1990) y Torres et al., (2004).

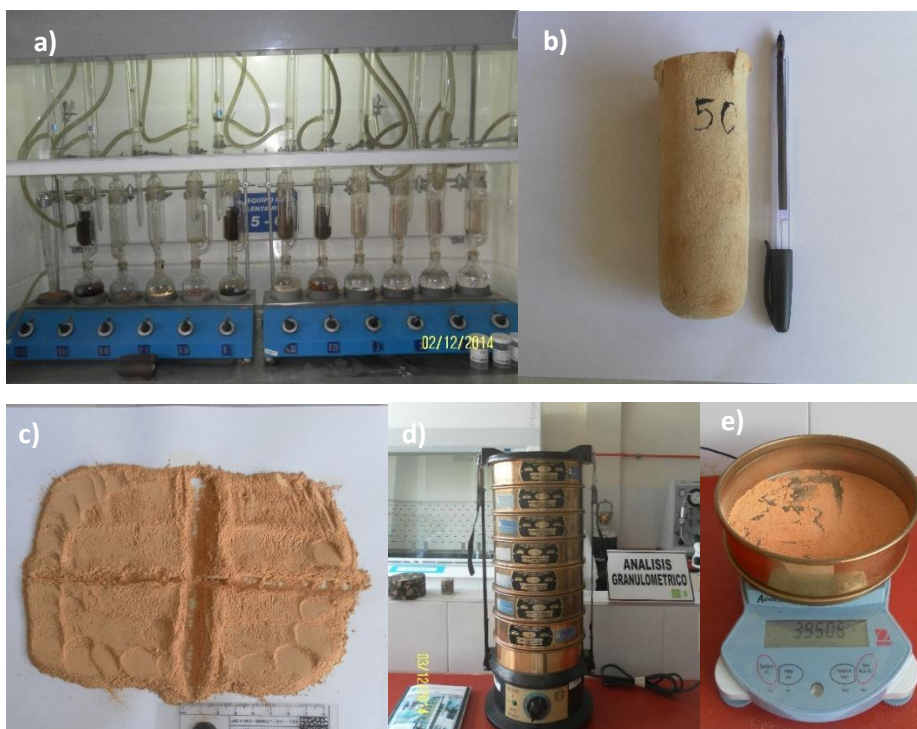
Figura 12: Diagrama de Strekeisen (1976) para clasificación de rocas Ígneas Plutónicas.



Fuente. Mantilla (2003).

4.4.2 Análisis granulométrico. El análisis granulométrico tiene por objetivo observar la variabilidad del tamaño de grano a medida que la meteorización química y física afecta a la roca, teniendo en cuenta que propiedades hidrogeológicas como la humedad relativa, microfracturas y la porosidad están relacionadas directamente con la granulometría y la calibración de los granos que componen la roca para los intervalos de meteorización entre altamente meteorizado (Intervalo IV), completamente meteorizado (Intervalo V) y el Suelo residual (Intervalo VI). El procedimiento para llevar a cabo esta prueba de granulometría fue determinado por Candelo et al (2008). En primera instancia se disgregaron las muestras con un mortero de una manera suave, sin cambiar el tamaño de grano que presenta la roca, posteriormente se llevaron las muestras a limpieza con Tolueno (solvente) en el Soxhlet (Fig. 13.a) por método de extracción y limpieza durante 8 horas utilizando un dedal (Fig.13.b) para preservar la muestra. Luego se llevan al horno a una temperatura 80 °C durante 12 horas. Se realiza un cuarteo (Fig. 13.c) para obtener 100 g representativos de la muestra; estos 100 g de muestra se llevan al tamizaje o zaranda (el cual debe pesarse antes de que se introduzca la muestra) durante 20 min (Fig. 13.d). Finalmente se pesa cada tamiz con la muestra retenida (Fig. 13.e) y se toma nota de estos valores. El equipo utilizado para este análisis, fue un mortero, bolsas plásticas, vasos, espátula, bandeja, balanza, Soxhlet, dedales de celulosa, horno y Zaranda con los tamices n° 8, 12, 35, 50, 100 y 200. Este análisis se desarrolló en el Laboratorio de Petrofísica y de estudios del Petróleo y Gas, adscrito a la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la Sede de Guatiguará, municipio de Piedecuesta.

Figura 13: Equipo y procedimiento utilizado en el Análisis Granulométrico; a) Soxhlet b) Dedal de Celulosa; c) Cuarteo de la muestra ya limpia, se selecciona pequeñas porciones de cada sección, hasta completar 100g de muestra representativa; d) Zaranda con los Tamices n° 8, 12, 35, 50, 100 y 200; e) pesaje de cantidad de muestra que quedo retenida en cada Tamiz.



4.4.3 Análisis de humedad relativa. El objetivo para realizar este análisis es comparar el contenido de humedad relativa en cada uno de los intervalos de meteorización, resaltando los intervalos donde haya un alto contenido, el cual será contrastado con el porcentaje de minerales arcilla y la granulometría de cada uno de los intervalos de meteorización tanto del perfil de Roca Néisica y el perfil de roca Granodiorítica. La aplicación práctica para la determinación del contenido de agua de un material, es poder conocer el peso del agua removida al secar dicho material cuando esta húmedo hasta un peso constante, en un Horno controlado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$); y usar este valor como el peso del agua atrapada naturalmente en los poros de la muestra. El peso del material remanente después de secado en el horno, corresponde al peso de las partículas sólidas (I.N.V. E-122). El equipo utilizado es un horno, una balanza y vasijas resistentes a la temperatura. Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Materiales adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil, ubicado en el Campus Central de Universidad Industrial de Santander, ciudad de Bucaramanga.

Figura 14: Equipo utilizado en el Análisis de Humedad Relativa.



4.4.4 Microscopia electrónica de barrido. Esta técnica fue empleada con el fin de observar los minerales arcilla y los cambios micro texturales que se encuentran en cada intervalo de meteorización cuyas muestras fueron examinadas a través de morfología comparada con las fotografías ya identificadas por diferentes autores como: Duzgoren et al., 2002; Borrelli et al., 2012; Borrelli et al., 2013; y las fotografías recopiladas en el Capítulo II del Libro de Ingeniería Geológica (González et al., 2002). El microscopio electrónico de Barrido, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma, para crear una imagen que refleja las características superficiales de sus constituyentes, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de estos.

El equipo utilizado fue Porta objetos, pinzas, Papel aluminio y un Microscopio Quanta FEG 650 de marca FEI (Figura 15), quien utiliza la tecnología de emisión de campo (Schotty Field EmissionGun) para la generación del haz de electrones. Para la realización de esta prueba, se debe obtener una muestra de aproximadamente 1 cm (sin pulir) que anteriormente haya sido secada en un horno a 60 ° C por 24 horas, se coloca en un porta objetos con una base o soporte de aluminio (si es necesario) para que no se mueva la muestra, luego se lleva a una cámara de vacío, en la cual la muestra se cubre con una capa de Carbono; y por último, se lleva al microscopio para hacer incidir el haz de electrones sobre la muestra. Esta prueba se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopia electrónica de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la sede Guatiguará, municipio de Piedecuesta.

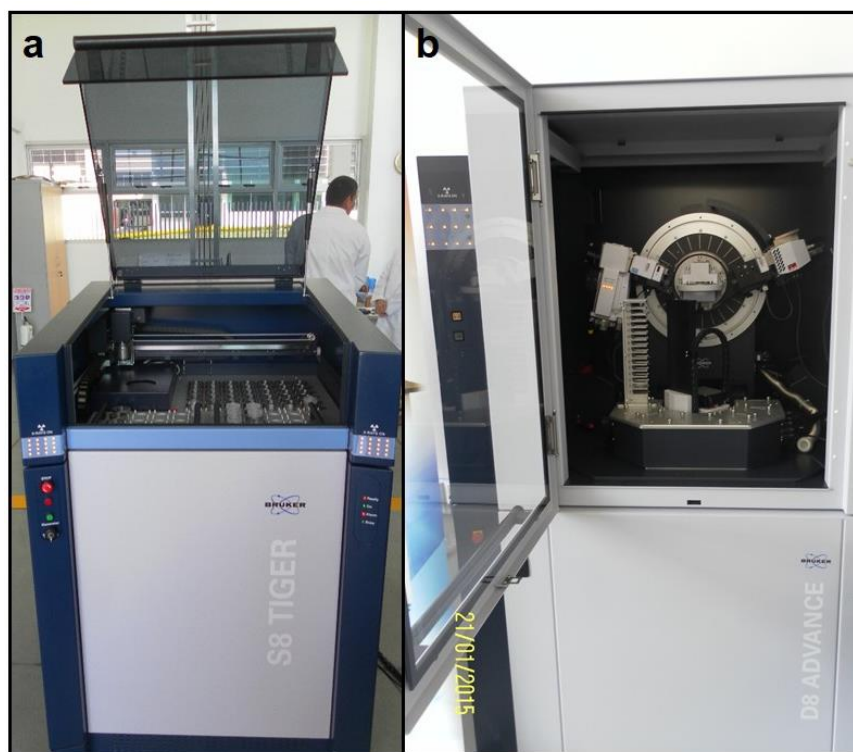
Figura 15: Equipo utilizado en Microscopia Electrónica de Barrido.



4.4.5 Fluorescencia de rayos X. El Objetivo general de esta prueba de laboratorio fue cuantificar los elementos y compuestos químicos presentes en los diferentes intervalos de meteorización, para luego hallar índices y patrones químicos de Meteorización de cada intervalo utilizando la metodología descrita por Price y Velbel (2002), Aristizabal et al., 2009; y Duzgoren et al., 2002. Dentro de la metodología de trabajo empleada en la toma de datos, los análisis cuantitativos se realizaron empleando curvas de calibración mediante el método de QUANT-EXPRESS (Parámetros Fundamentales) en un Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X de longitud de onda dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER (Figura 16.a) detector de Centelleo para elementos pesados y de Flujo para elementos livianos, la fuente de Rayos-X fue un tubo de Rodio (Rh) y un Goniómetro de alta precisión para ángulos theta y 2 theta. Esta prueba se llevó a cabo en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la sede de Guatiguará municipio de Piedecuesta.

4.4.6 Difracción de rayos X. Esta técnica fue utilizada en ciertos intervalos de meteorización, especialmente en el perfil de roca Granodiorítica como aporte a la identificación de Minerales mediante el análisis cualitativo de las fases presentes en cada una de las muestras gracias a la comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD). Para llevar a cabo este análisis las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de $38\ \mu\text{m}$ (400 mesh). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en porta-muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. La toma de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci (Figura 16.b). Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la sede de Guatimará municipio de Piedecuesta.

Figura 16: a) Equipo utilizado en Fluorescencia de Rayos X b) Equipo utilizado en Difracción de rayos X.



4.4.7 Ensayos de porosidad. Para la realización del Ensayos de Porosidad, las muestras tuvieron una preparación especial basada en la NORMA API RP 40: Practicas recomendadas para el análisis de Núcleos, la cual describe la forma de extracción de Plugs a partir de una muestra y su tratamiento para la preservación de la misma; este procedimiento es diferente para rocas consolidadas y no consolidadas, ya que las propiedades físicas de las rocas son diferentes. Para las rocas Consolidadas (Intervalos de meteorización I, II, III y IV) la metodología empleada se llevó a cabo mediante los siguientes equipos: un cortador de núcleos tipo árbol con una broca de diamante capaz de perforar muestras cilíndricas de diámetro de 1.5" y altura aproximada de 4 a 5 cm, bomba de fluidos para llevar refrigerante (salmuera), perfiladora para cuadrar los extremos de los tapones y tinta china para identificar los núcleos. Para rocas no consolidadas se utilizaron cilindros de aluminio huecos con las siguientes medidas: altura promedio 43.42375 mm, grosor 0.265 mm y diámetro 35.4 mm, el cual fue utilizado para la realización de los plugs, dicho cilindro de aluminio hueco se introdujo en cada una de las muestras no consolidadas (Intervalos de meteorización V y VI) y se selló el plug con 2 mallas en cada extremo, una de 100 y otra de 200 para evitar la pérdida de material durante la realización de la prueba, después de la realización de todos los Plugs tanto para muestras consolidadas como no consolidadas, éstas se llevaron a limpieza en el Soxhlet, luego al horno a 80°C por 12 horas y finalmente al Porosímetro.

Figura 17: Equipo utilizado para hallar porosidad: Porosímetro



4.5 FASE 5: REVISIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO Y EN CAMPO.

- Análisis de la petrografía, mineralogía y estructuras, evidenciadas de manera macroscópica en muestras de mano y de manera microscópica a partir de las laminadas delgadas y microcopia electrónica de barrido.
- Análisis del porcentaje de humedad, peso unitario seco y granulometría, como parámetros de caracterización de cada uno de los perfiles de meteorización.
- En el análisis de los resultados químicos se determinaron las pérdidas por Ignición (L.O.I), Índice de meteorización de Ruxton (R) y el índice químico de alteración (CIA) además de la evolución química utilizando los diagramas de variación (Aristizábal et al., 2009).
- Análisis de las propiedades hidrogeológicas a partir de la porosidad vista en las secciones delgadas y porosidad mediante el Porosímetro de Helio del Laboratorio de Petrofísica de la Universidad Industrial de Santander.

4.6 FASE 6: EDICIÓN DOCUMENTO FINAL

Esta fase se llevó a cabo a partir de la interpretación; dándose a conocer los resultados obtenidos, el mapa geológico y perfiles conceptuales de meteorización, junto con las conclusiones y recomendaciones a las que se llegarán con base en estos resultados.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 DEFINICIÓN DE METEORIZACIÓN

La meteorización se define como, el conjunto de procesos que cambian las características originales de la roca, la cual se somete a los agentes activos de la intemperie como la presencia de agua, la temperatura y la actividad de los organismos. Esta meteorización genera una nueva roca con otras características mecánicas y químicas. Según Aristizábal (2011) la meteorización se define como “el proceso de alteración y separación de la roca en suelo” y considera que los cambios drásticos de la lluvia y la temperatura son el control dominante de la meteorización. Por otro lado González (2002) en el Libro de Ingeniería Geológica define la meteorización como la desintegración y/o descomposición de los materiales geológicos en superficie, incluyendo dentro de este término todas las alteraciones físicas y químicas que modifican las características y propiedades de los materiales rocosos originales.

5.2 PROCESOS DE METEORIZACIÓN

Para Spalletti, (2007) la meteorización se presenta con dos procesos esenciales, uno de carácter físico o mecánico llamado desintegración y el otro de carácter químico llamado descomposición. Las acciones de origen físico producen la fracturación mecánica de las rocas, ampliando las áreas de contacto del material rocoso con los agentes de la meteorización. Los procesos de desintegración más comunes son: **Crecimiento cristalino**, causado por la precipitación de sales que el agua transporta al interior de la roca; **Gelifracción**, el agua que rellena los poros y grietas se congela al bajar la temperatura aumentando de volumen y fracturando la roca; **Insolación**, en climas áridos las diferencias térmicas en periodos cortos de tiempo producen tensiones y dilataciones (contracciones sucesivas), provocando el fracturamiento de la roca en su caras externas, resultando una exfoliación o descamación concéntrica (Capas Sucesivas como “Cebollas”; Spalletti, 2007) y

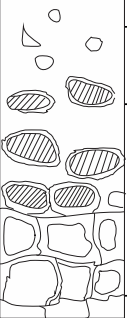
Alivio de Presión, se presenta cuando el proceso de denudación es muy rápido y la eliminación de la carga litostática produce una fracturación por expansión o dilatación, generando estructuras o superficies paralelas al terreno.

Por su parte la meteorización química conduce a cambios en la composición química y la mineralogía de las rocas cuyo agente principal es el agua. En ambientes tropicales la meteorización química es 3.5 veces más que en lugares templados (Spalletti, 2007). Los procesos de meteorización química son: **Disolución**, como efecto de la acción solvente del agua en contacto con las sales de la roca; **Oxidación**, son las reacciones en las que el radical pierde electrones (se combina con un Oxígeno) y es la descomposición de los minerales ferromagnesianos (Olivino, Anfíbol y Piroxeno) **Carbonatación**, consiste en la reacción química de iones de carbonato y de bicarbonato con los minerales originales; **Hidratación**, el agua puede pasar a formar parte de la estructura cristalina del mineral, aumentando la superficie susceptible a otras reacciones; e **Hidrolisis**, reacción de una sustancia con el agua, el ion H^+ ataca y sustituye los cationes dentro de la estructura cristalina del mineral, que se descompone.

5.3. MODELOS CONCEPTUALES DE METEORIZACIÓN

La meteorización ha sido un tema de estudio de muchos autores, los cuales han generado variados modelos conceptuales sobre la evolución de las rocas en condiciones de intemperie (Tabla 1).

TABLA 1: Recopilación bibliográfica de modelos conceptuales de Meteorización.

PERFIL ESQUEMATICO	SOWERS(1954-1963)	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEEREY PATTON (1971)	ISRM (1981)	DEWANDEL ET AL (2006)	BORRELLI ET AL (2013)	
	IGNEAS Y METAMORFICAS	ROCAS IGNEAS	IGNEAS Y METAMORFICAS	MACIZOS ROCOSOS	ROCAS IGNEAS	ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	
						Masa Rocosa/Afloramiento	Bloque/muestra de mano
	Zona Superior	VI Suelo Residual	Horizonte IA	VI SUELO RESIDUAL	Laterita o Corteza de Hierro	VI Suelo residual y Coluvión	
		V Completamente Alterada	Horizonte IB	V COMPLETAMENTE METEORIZADO	Saprolito o Alterita, Regolito	IV Completamente Meteorizada	
	Zona Intermedia	IV Altamente Alterada	Horizonte IC (Saprolito)	IV ALTAMENTE METEORIZADO		IV Altamente Meteorizado	
	Zona Parcialmente Alterada	III Moderadamente Alterada	IA Transición con roca meteorizada	III MODERADAMENTE METEORIZADO	Capa Laminada	III Moderadamente Meteorizada	
		II Debilmente Alterada	IB Parcialmente Meteorizada	II LIGERAMENTE METEORIZADO	Capa Fisurada	II Ligeramente Meteorizada	
		IB Muy Poco Alterada		I ROCA FRESCA	Basamento Fresco	I FRESCA	
	Roca Inalterada	IA Roca Sana	Roca Sana				

Fuente. González et al., 2002. Ingeniería Geológica. Capítulo 2: Mecánica de Suelos; Pág. 19.

Modificado por las autoras.

Uno de los Primeros Autores en hablar sobre la meteorización y los diferentes intervalos que desarrolla, fue Sowers (1954-1963) el cual dividió el suelo residual en 3 zonas una *Zona Superior* que se caracteriza por presentar un alto grado de meteorización y en donde hay erosión de material, una *zona intermedia*, compuesta por material algo degradado tanto en la parte superior como en la parte inferior y una *zona parcialmente meteorizada* que es una zona de transición entre la roca meteorizada y la roca parental. Posteriormente el Grupo de Ingeniería de la Sociedad de Geología (Geological Society Engineering Group) definió en 1970 el perfil de meteorización, dividiéndolo en 7 intervalos, diferenciando los primeros estados de meteorización entre IA-Roca Sana y IB: Muy Poco Meteorizada, pasando a II Débilmente Meteorizada, III moderadamente Meteorizada, IV Altamente Meteorizada, hasta V completamente Meteorizada y VI Suelo Residual, como la etapa final de degradación y desintegración causada por la meteorización. Deer y Pattton en 1971, definieron el perfil de meteorización en 3 zonas subdivididas

por horizontes; en el tope del perfil de meteorización se encuentra un Horizonte IA que corresponde al horizonte Laterítico; de manera descendente en el grado de meteorización y en profundidad se encuentra la zona de Suelo residual, dividida por el Horizonte IB y el Horizonte IC que corresponde al Saprolito, seguidamente se encuentra la zona de Transición, dividida por el Horizonte IA transición de roca meteorizada y IB roca parcialmente meteorizada; en la parte más profunda del perfil se encuentra la roca sana, que no presenta signos de meteorización química.

Los modelos conceptuales aplicables a las características físicas, geoquímicas e hidrogeológicas medidas en el presente estudio (Tabla 2), son los realizados por ISRM en el año 1981 para macizos rocosos; Dewandel et al (2006) en su trabajo “A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifer controlled by single or multiphase weathering.” En el cual define el perfil de meteorización con los siguientes intervalos representativos: El Basamento Fresco considerado impermeable y de muy bajo coeficiente de almacenamiento y la Capa Fisurada, la cual presenta en la base fisuras subhorizontales y subverticales y Borrelli et al (2013) en su trabajo “Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy)”. Dichos modelos describen acertadamente las características recolectadas en campo y determinadas en el laboratorio.

La Tabla 2, reúne todos los criterios y características relevantes de los diferentes intervalos de meteorización según estos autores y fue la base para establecer el modelo conceptual de perfil de meteorización, tanto para rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Santander, realizado en el presente estudio.

TABLA 2: Recopilación de modelos conceptuales según los siguientes autores: ISRM (1981), Dewandel et al (2006) y Borrelli et al (2013), reuniendo las características físicas relevantes para los diferentes intervalo de meteorización.

ISRM (1981)	DEWANDEL ET AL (2006)	BORRELLI ET AL (2013)	DESCRIPCIÓN AFLORAMIENTO
MACIZOS ROCOSOS	ROCAS ÍGNEAS	ROCAS ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	
VI SUELO RESIDUAL	LATERITA O CORTEZA DE HIERRO	VI SUELO RESIDUAL Y COLUVIÓN	Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material. El macizo rocoso se compone principalmente de suelos residual, coluviales y detrítico-coluviales (más del 70% del afloramiento); bloques pequeños pueden estar constituidos por roca moderadamente o altamente meteorizada y / o el suelo saprolítico. El material de roca tiene principalmente las siguientes características: completamente decolorados; piezas de gran tamaño pueden ser fácilmente disgregadas con las manos y se desmorona por la presión de los dedos en los granos constituyentes. Los volúmenes constituidos por suelos residuales, se encuentran rara vez en el afloramiento y generalmente ubicados en coronas, presentando fracciones de arena y limos. Los volúmenes de los suelos coluviales constituidos, por lo general se encuentran en las pendientes y en los huecos geomorfológicos, están formados por depósitos caóticos de arena-limos, incluyendo fragmentos de roca centimétricos entre moderada y altamente meteorizado y fragmentos orgánicos subordinados. Los volúmenes constituidos por suelos detríticos-coluviales, se encuentran ubicados generalmente en las partes bajas de las pendientes, están representados por depósitos de estructura desorganizada, formados por arena y grava entre moderada y altamente meteorizada, fragmentos de roca disimétrica altamente meteorizada y fragmentos orgánicos subordinados. En algunas ocasiones puede estar ausente, debido a la erosión o re-hidratación de hemetita. Se disgrega con el tacto, deleznable con el martillo y puede desconcharse con una navaja.
V COMPLETAMENTE METEORIZADO	SAPROLÍTO O ALTERITA, REGOLITO	V COMPLETAMENTE METEORIZADA	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo, completamente descolorido. No conserva la estructura original de la roca o se encuentra en forma de relicto. La masa de roca está completamente meteorizada (saprolito) (más de 70% del afloramiento); volúmenes macizos rocosos limitados y aislados pueden estar constituidos por roca completamente meteorizada o suelo residual. En este intervalo se define la <i>Alloterite</i> : la cual es un horizonte arcilloso, donde se presenta una reducción de volumen relacionado con procesos de meteorización mineralógica. Se disgrega con el golpe del martillo pero no se puede obtener un bloque muestra del afloramiento, porque se disgrega en fragmentos, el filo de la navaja esculpe fácilmente la superficie de la roca, piezas grandes se pueden romper con la mano y se disgregan en agua; se puede hacer marcas profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo. Generalmente presenta fracciones de grava y arena. Valor N Schmidt: 0-15
IV ALTAMENTE METEORIZADO		IV ALTAMENTE METEORIZADO	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo, completamente descolorido. La masa de roca está altamente meteorizada (más de 70% del afloramiento); volúmenes de macizos rocosos limitados por discontinuidades pueden estar constituidos por roca moderadamente o altamente meteorizada. Los volúmenes constituidos por suelos residuales, se presentan rara vez en el afloramiento, las fracciones arena y limos son predominante. En este intervalo se define la <i>Isalterita</i> en la cual los procesos de meteorización sólo inducen un ligero o ningún cambio del volumen y conservan la estructura de la roca original. Se disgrega con el golpe del martillo, puede obtenerse un bloque de muestra del afloramiento, crea un sonido sordo intermedio cuando es golpeado por el martillo, piezas grandes se rompen con facilidad si se golpean con un martillo; piezas de gran tamaño no se disgregan con el agua; el filo de la cuchilla produce un rasguño en la superficie de la roca. Valor N Schmidt 10-25.
III MODERADAMENTE METEORIZADO	CAPA LAMINADA	III MODERADAMENTE METEORIZADA	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados. La masa de roca esta moderadamente meteorizada (más de 70% del afloramiento); Los volúmenes del macizo rocoso limitados por discontinuidades pueden estar constituidos por rocas moderadamente o ligeramente meteorizada. Es la base de la <i>Isalterite</i> , presenta laminación horizontal de los minerales más grandes (por ejemplo, pórfidos de feldespato), pero sigue conservando en gran medida la estructura original de la roca. Los colores penetrantemente son más tenues en comparación con la roca fresca, pero localmente el color de la roca fresca está presente. Para rocas ígneas moderadamente meteorizadas, se observan fracturas concoideas o concéntricas (Core Stones) formando estructuras de "Cascarones". Se fractura con el golpe del martillo, pero se necesita más de un golpe para sacar de la muestra piezas grandes apenas se rompen si son golpeados por la cabeza del martillo; la punta del martillo geológico puede producir una raya en la superficie de la roca. Valor N Schmidt: 25-50.
II LIGERAMENTE METEORIZADO	CAPA FISURADA	II LIGERAMENTE METEORIZADA	La masa de roca está ligeramente meteorizada (más de 70% del afloramiento); las discontinuidades, pueden estar constituidas por roca moderadamente meteorizada. Presenta el mismo color de la roca fresca con decoloración sólo cerca de las discontinuidades; textura y microestructura de la roca fresca originales se conservan perfectamente. Se caracterizada por presentar fisuras densas horizontales en los primeros metros y a una mayor profundidad fisuras sub-horizontales y sub-verticales. Difícilmente se fractura con el golpe del martillo, se necesitan muchos golpes para romper la muestra, produce un sonido de timbre cuando es golpeada por el martillo. Valor N Schmidt: más de 50.
I ROCA FRESCA	BASAMENTO FRESCO	I ROCA FRESCA	Roca sin cambio desde el estado original o solo ligeramente manchado a lo largo de las discontinuidades. La masa de roca es fresca (más de 70% del afloramiento); Puede ser considerado como impermeable y de muy bajo coeficiente de almacenamiento, en una escala local. Solo se pueden romper esquirlas de la muestra con el martillo geológico.

5.4. PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS EN ROCAS CRISTALINAS

Las Rocas ígneas o metamórficas, conceptualmente se consideran impermeables pero en la medida que sufren cambios por fracturamiento o degradación de la roca, esta condición puede cambiar y constituirse en zonas de recarga e incluso en reservorios de agua (acuíferos). Las mejores herramientas para definir y cualificar esa potencialidad, son las propiedades hidrogeológicas medidas en los acuíferos convencionales; tales como la Porosidad, la Humedad relativa y la Permeabilidad, definidas por Sánchez, 2009.

La **porosidad** se refiere según Sánchez, 2009; a los espacios abiertos en los diferentes tipos de rocas; en las Rocas Cristalinas, los espacios corresponden a fracturas, diaclasas, planos de estratificación y cavidades producto de disolución, llamada también porosidad secundaria; en rocas estratificadas y depósitos sedimentarios, los poros que están presentes entre los granos individuales y los minerales, constituyen a la porosidad primaria o intergranular.

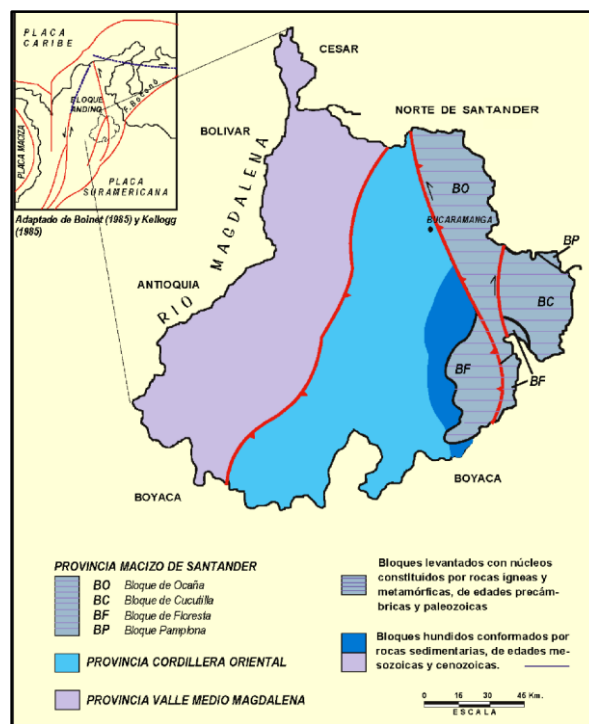
La **Permeabilidad**, se refiere en pocas palabras a la capacidad de la roca para transmitir agua que en rocas cristalinas está determinada por el tamaño de las fracturas, diaclasas y por el tamaño de las aberturas a lo largo de los planos de estratificación y el tamaño de las cavidades producto de la disolución, la conexión entre estas es un factor determinante en el grado de permeabilidad; mientras que en rocas blandas la permeabilidad está relacionada con el tamaño de los granos y la selección de los mismos; altas permeabilidades están asociadas a rocas compuestas por granos redondeados y gruesos que se encuentran bien seleccionados (Sánchez, 2009).

Finalmente, la **Humedad Relativa** comprende la cantidad de agua atrapada dentro de los poros que presenta la roca o material disgregado según sea el caso.

6. MARCO GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL

La zona de estudio se encuentra geológicamente ubicada en la Provincia Tectónica del Macizo de Santander, dentro del bloque Floresta, (Figura 18, Royero y Clavijo, 2001) esta Provincia se encuentra influenciada fuertemente por la Falla de Bucaramanga, ambas con rasgos de rumbo general NW. Compuesto principalmente por rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas, y rocas ígneas paleozoicas y mesozoicas³ Dentro de las litologías presentes en la zona se encuentra el Neis de Bucaramanga, El grupo plutónico de Santander, la Formación Silgara, la Formación Girón y Depósitos cuaternarios como aluviones, terrazas y conos de deyección según Mapa Geológico del cuadrángulo H12, escala 1:100.000 (Ward et al., 1977), correspondiente a Bucaramanga.

Figura 18. Esquema tectónico del departamento de Santander.



Fuente. Royero y Clavijo (2001).

³ Tomado de: Memoria Explicativa Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander, adaptado de Clavijo et al. (1993).

6.1. FALLA DE BUCARAMANGA

La estructura principal de esta provincia Tectónica es el Sistema de Fallas de Bucaramanga – Santa Marta, cuyo trazo principal se caracteriza por ser una falla de Rumbo Sinistral, el cual el componente vertical varía en algunos sectores según Julivert (1958, 1961) llegando a ser una falla inversa. Esta tiene un desplazamiento aproximado de 100 – 110 m calculado por Cambell (1965).

6.2. CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA 1:10.000

Para la realización de esta cartografía se tuvo en cuenta el mapa geológico H12 a escala 1:100.000 (Ward et al., 1977), el mapa litoestructural de la cuenca del río Lato a escala 1:25.000 generado por Caballero (1995), Mapa de zonas de interés hidrogeológico del Macizo de Santander-Cuenca superior del Río Lebrija (Ulloa et al., 2006) escala 1:75.000 y el Mapa Hidrogeológico del área metropolitana de Bucaramanga (INGEOMINAS; 2002) a escala 1:50.000; y de los cuales se determinaron las siguientes litologías y su correlación en la zona de campo.

6.2.1 Neis de Bucaramanga. Actualmente esta unidad es llamada Complejo de Bucaramanga (PEm) por Royero et al, 2001. Se caracteriza por ser una secuencia de alto grado de metamorfismo, que comprende Paraneises Cuarzo-feldespáticos, hornblendíticos, micáceos y granatíferos y cantidades subordinadas de Anfibolitas, Migmatitas, Cuarcitas, Mármoles y esporádicamente Granulitas de edad Precámbrica (Royero et al, 2001), su distribución corresponde a tres fajas en el denominado Macizo de Santander en el nororiente colombiano, localizadas al oriente de la Falla de Santa Marta – Bucaramanga (Ward et al, 1973). Algunas dataciones de Rb/Sr en roca total realizadas por Goldsmith et al 1971, en el Neis Biotítico cerca a la quebrada El Volcán y dataciones de K/Ar en el Neis Hornblendítico cerca Ocaña al W de la Falla de Bucaramanga – Santa Marta, arrojan edades entre 680 ± 140 y 950 ± 40 m.a. ubicando a este cuerpo metamórfico en el Proterozoico Superior (Royero et al, 2001). La unidad Tipo del Neis de Bucaramanga se encuentra ubicada en el Cerro de la Judía, el cual se encuentra aproximadamente 8.47 km del área de estudio.

Los afloramientos del Neis de Bucaramanga que se encuentran dentro de la zona, son: Neis Biotítico (Figura 19.a), Neis Milonitizado (Figura 19.b), Neis Cuarzo-feldespático (Figura 19.c mayoritariamente) y Neis Anfibolítico (Figura 19.d).

Figura 19: muestras de mano que corresponden a los afloramientos del Neis de Bucaramanga, en la zona de estudio.



6.2.2 Grupo plutónico de Santander. Nombre propuesto por Ward et al (1973), el cual reúne a diversas litologías ígneas félsicas a intermedias. Esta unidad involucra cuerpos ígneos denominados posteriormente por Royero et al (2001) como Cuarzomonzonita Rosada (Batolito de Santa Bárbara), Cuarzomonzonita gris (Cuarzomonzonita de la Corcova), Granito rosado (Granito de Pescadero) y Granodiorita-Tonalita. En la zona de estudio se encontraron afloramientos de Diorita, Granodiorita-Tonalita, Cuarzomonzonita Gris y Monzogranito, que comparada con la literatura, tendría una relación acertada pero que varía en el detalle, ya que la cartografía que se realizó en este trabajo fue de 1:10.000 y en la bibliografía se definen las litologías a escala 1:100.000.

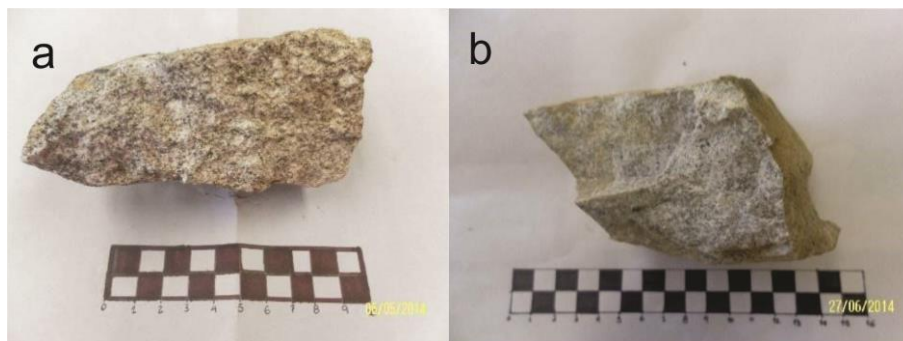
6.2.2.1 Diorita. Roca de composición intermedia, la cual presenta mayoritariamente Plagioclasa y otros minerales como Biotita, Actinolita, Hornblenda y Cuarzo. Es de color Gris oscuro, de textura Fanerítica – Holocristalina; estructura masiva; de tamaño de grano medio a grueso y forma de los granos Euhedrales. La Diorita se encuentra aflorando en el trazo del Carreteable Pozo Negro-Cristales en la Vereda de Las Rosas, y el Carreteable Seminario San Alfonso – Alto de la Mata; Municipio de Piedecuesta.

Figura 20: Diorita perteneciente a la estación E29, ubicada en el Carreteable Vía ICP - Cristales, trayecto de Pozo Negro a la Vereda las Rosas; X= 1117616, Y= 1269168, Z= 2191.



6.2.2.2 Granodiorita – Tonalita (Jgd). Estas rocas afloran al nororiente del departamento de Santander y constituyen el Batolito Granodiorítico de Rionegro y el Plutón Tonalítico de Páramo Rico. La granodiorita del Batolito de Rionegro es de color gris, de grano medio a grueso, subporfirítico, compuesta por andesina, cuarzo, microclina y biotita. La tonalita del Plutón de Páramo Rico es de color gris verdoso, de grano medio, con variaciones locales a granodiorita; está constituida por andesina, cuarzo, hornblenda y feldespato potásico. También existe un pequeño cuerpo de tonalita en el Río Suratá al norte de su confluencia con el Río Tona (Royero et al., 2001). Dentro de la Zona de estudio se hallaron afloramientos de Granodiorita y Tonalita en las veredas La Mata, La Palma y Las Rosas, de color blanco a gris claro, de textura fanerítica – holocristalina, estructura masiva, cristales euhedrales de tamaño medio a muy grueso y compuesta principalmente por cuarzo, Plagioclasa, biotita, anfíbol, moscovita y caolinita.

Figura 21: a) Granodiorita que aflora en la estación E20 ubicada en el Carreteable Vía ICP – Cristales, vereda las rosas; X= 1117860, Y= 1269231, Z= 2225; y b) Tonalita que aflora en la estación E29, ubicada en el Carreteable Vía ICP - Cristales, trayecto de Pozo Negro a la Vereda las Rosas; X= 1117616, Y= 1269168, Z= 2191.



6.2.2.3 Cuarzomonzonita Gris (Jcg). Es una Cuarzomonzonita de color gris, de tamaño de grano fino a medio, la cual es la litología principal de Plutón de la Corcova, observable sobre las vías Bucaramanga-Pamplona y Los Curos-Guaca; está compuesta de Cuarzo, Feldespato potásico, Plagioclasas, Biotita y Moscovita; los accesorios son Apatito, Óxidos de hierro y Zircón; como minerales de alteración contiene Clorita, Epidota y Sericita. (Royero et al., 2001).

Figura 22: Cuarzomonzonita que aflora en la estación E38, ubicada en el Carreteable Seminario San Alfonso – Alto de la Mata; X= 1113675, Y= 1269507, Z= 1378.



6.2.2.4 Monzogranito. El Monzogranito aflora en vereda Las Rosas, presentado color Blanco - Rosado Claro, su textura es Fanerítica – Holocristalina, de estructura masiva y de cristales Euhedrales – Subhedrales de tamaños pegmatíticos (Megafenocristales $> 0 = 5 \text{ mm}$ y fenocristales $> 0 = 0.3 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$). Los minerales que presenta son Cuarzo, Plagioclasa, Feldespato Potásico, Moscovita y Epidota.

Figura 23: Monzogranito que aflora en la estación E22, ubicada en el Carreteable ICP-Cristales, Vereda Las Rosas; X= 1117523, Y= 1268548, Z= 2125.



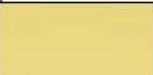
7. RESULTADOS

7.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS INTERVALOS DE METEORIZACIÓN MEDIANTE LAS OBSERVACIONES DE CAMPO

Se recorrieron, 36 Km² del área de estudio, por medio de los diferentes carreteables, alcanzando a un total de 62 estaciones, de las cuales 24 corresponden a roca ígnea (Cuarzomonzonita, Tonalita, Granodiorita, Diorita y Monzogranito), 21 a roca metamórfica (Neis Cuarzo Feldespático, Neis Anfibolítico, Neis Biotítico y Neis Milonitizado), 10 afloramientos de contacto intrusivo entre roca ígnea y metamórfica y 6 afloramientos de suelo residual.

A partir de las descripciones en campo, teniendo en cuenta los cambios físicos y químicos que presentan las rocas como por ejemplo degradación del color (Tabla 3), el grado de resistencia mecánica (principal criterio, Tabla 4), la densidad de fracturas, la presencia de minerales arcillosos y óxidos; y asumiendo e integrando los modelos conceptuales propuestos por la ISRM (1981); Dewandel (2006) y Borrelli (2013) se obtuvo como resultado los diferentes intervalos descritos a continuación.

TABLA 3. Degradación del color desarrollado en cada uno de los perfiles de meteorización.

PERFIL METAMORFICO			PERFIL IGNEO		
Intervalo meteorizacion	COLOR SEGÚN MUNSELL	REPRESENTACION	Intervalo meteorizacion	COLOR SEGÚN MUNSELL	REPRESENTACION
I	7,5YR 5/8 STRONG BROWN		I	2,5YR 8/6 YELLOW	
II	7,5YR 6/8 REDDISH YELLOW		II	2,5YR 8/4 POLE YELLOW	
III	7,5YR 6/8 REDDISH YELLOW		III	2,5YR 8/2 POLE YELLOW	
IV	10YR 7/6 YELLOW		IV	7,5YR 7/6 REDDISH YELLOW	
V	10YR 7/8 YELLOW		V	7,5YR 8/6 REDDISH YELLOW	
VI	7,5 YR 8/6 REDDISH YELLOW		VI	7,4YR 8/4 PINK	

Fuente. Munsell (1994).

TABLA 4: Medida Cualitativa Grado de Resistencia Mecánica, utilizado para la caracterización de ambos perfiles de meteorización (Roca Ígnea y Metamórfica).

Medida Cualitativa Grado de Resistencia Mecánica			
Resistencia a compresión simple Mpa	Grado de meteorización	Grado de resistencia mecánica	Características
1.0 - 5.0	IV	1-2 ROCA MUY DÉBIL	Se disgrega con el tacto, deleznable con el martillo y puede desconcharse con una navaja
5.0 - 25	V	3-4 ROCA DÉBIL	Se Disgrega con el golpe del martillo pero no se puede obtener un bloque muestra del afloramiento, porque se disgrega en fragmentos, puede desconcharse con dificultad con una navaja; se puede hacer marcas profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo
25 - 50	IV	5-6 ROCA MEDIA	Se Disgrega con el golpe del martillo, puede obtenerse un bloque muestra del afloramiento, no se puede rayar o desconchar con la navaja
50 - 100	III	7-8 ROCA DURA	Se fractura con el golpe del martillo, pero se necesita más de un golpe para sacar la muestra
100 - 250	II	9 ROCA MUY DURA	Difícilmente se fractura con el golpe del martillo, se necesitan muchos golpes para romper la muestra
> 250	I	10 ROCA EXTREMADAMENTE DURA	Solo se pueden romper esquirlas de la muestra con el martillo geológico

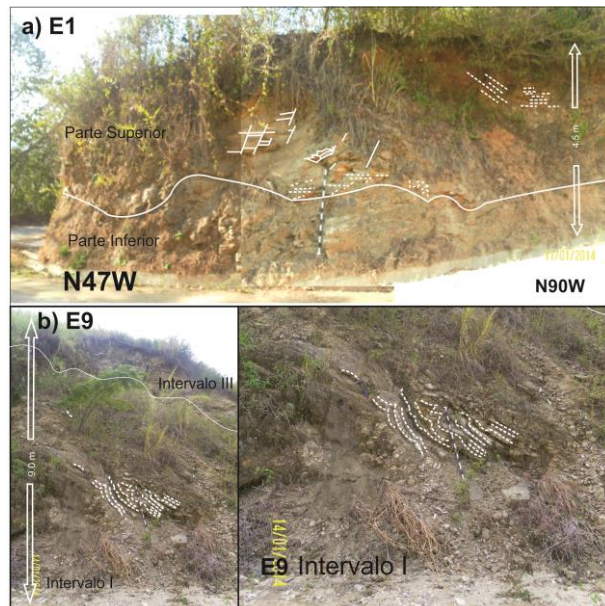
Fuente. ISRM (1981). Modificado por las autoras.

Estos perfiles de meteorización distribuidos espacialmente en la zona de estudio se definen por diferentes intervalos de meteorización, tanto las rocas Ígneas como las metamórficas presentan perfiles de meteorización complejos debido a su distribución, variedad litológica y los procesos tectónicos que han sufrido.

7.1.1 Perfil de Roca Metamórfica

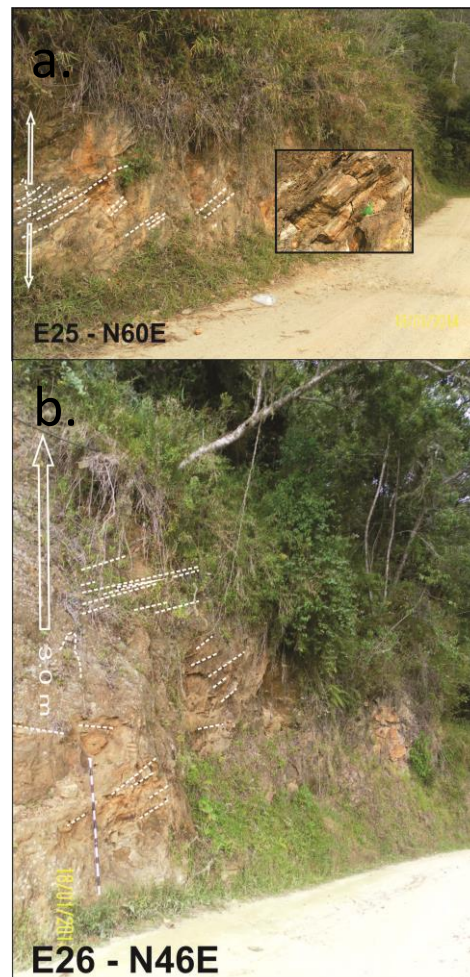
7.1.1.1 Intervalo I – Roca Fresca. Corresponde a las estaciones E1, E9 y E34: Neis Cuarzo Feldespático y E8: Neis Biotítico, en los afloramientos se observan planos de foliación que se comportan como planos de debilidad, algunas familias de diaclasas principales, la densidad de las fracturas es baja, algunas rellenas de material lodoso, la coloración es 7,5YR 5/8 STRONG BROWN (Tabla 3) color característico de la roca original, el tamaño de grano varía de fino - muy grueso (0.125 -2 mm), el promedio de porcentaje de minerales arcillosos es de 4.2 %, se le atribuye un 10 al grado de resistencia mecánica (Tabla 4) y un promedio de minerales oxidados de 22.5%.

Figura 24: Las fotografías a) estación 1 (coordenadas X: 1.113.637, Y: 1.267.028 y Z: 1.139) y b) estación 9 (coordenadas X: 1.114.347 Y: 1.267.523 y Z: 1.408), representan al Intervalo de meteorización I de composición Neis Cuarzo Feldespático. En a) se diferencié que la parte inferior presenta fracturas más cerradas con respecto a la parte superior. Las líneas continuas representan las familias de diaclasas y las discontinuas los planos de foliación.



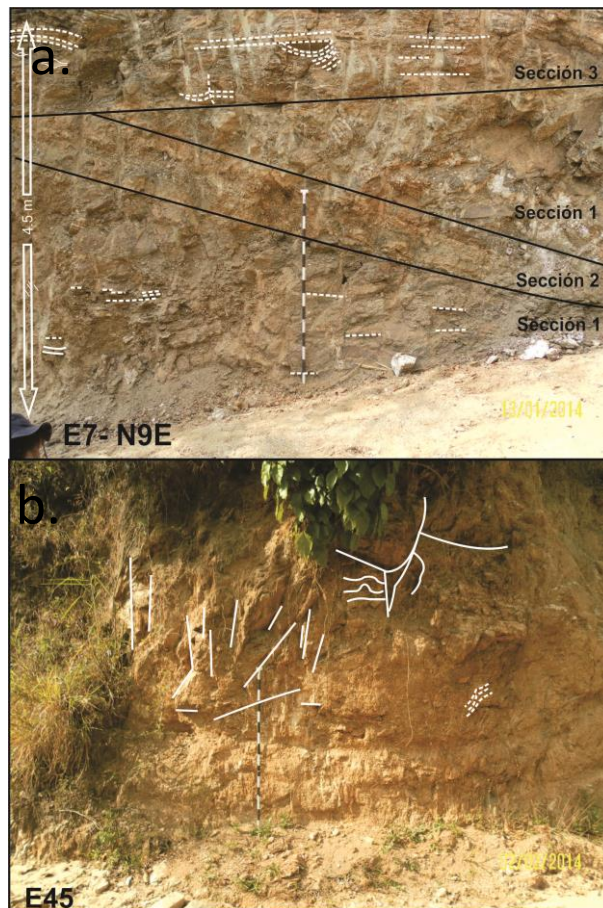
7.1.1.2 Intervalo II – Roca ligeramente meteorizada. Corresponde a las estaciones E25 y E26: Neis Cuarzo Feldespático de coloración 7,5YR 6/8 REDDISH YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de medio - muy grueso (0.25 – 2 mm), presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 15%, con un promedio de minerales oxidados de 52.5% y un valor de resistencia mecánica de 9 (Tabla 4). Estos afloramientos se encuentran altamente fracturados y diaclasados, en ellos se observa el plano de foliación, las fracturas son abiertas y cerradas con un espaciado entre ellas de 5-25 cm.

Figura 25: Fotografías a) estación 25 (coordenadas X: 1.118.953, Y: 1.271.499 y Z: 2.353) y b) estación 26 (coordenadas X: 1118536 Y: 1.270.714 y Z: 2.416) del Intervalo de meteorización II de litología Neis Cuarzo Feldespático, la línea punteada representa los plano de foliación.



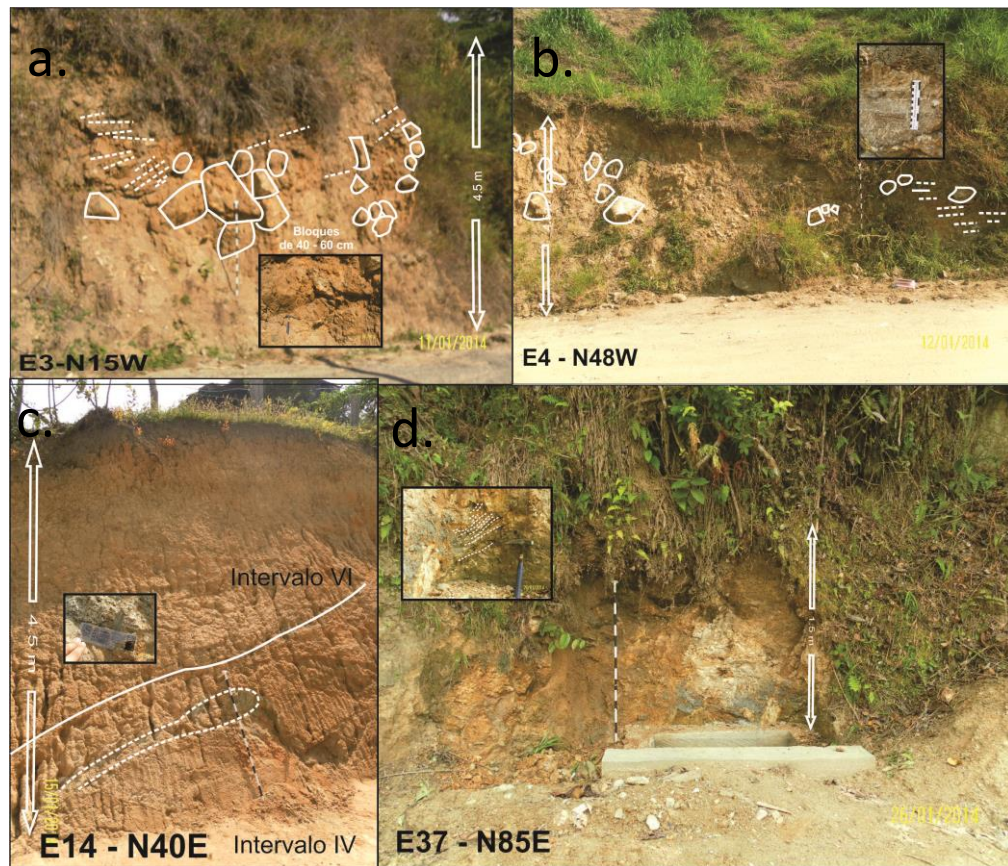
7.1.1.3 Intervalo III – Roca moderadamente meteorizada. Corresponde a las estaciones E7, E9 Parte superior y E45: Neis Cuarzo Feldespático de coloración 7,5YR 6/8 REDDISH YELLOW (Tabla 3) con tamaños de grano que varían de fino - muy grueso (0.125 – 2mm), presentan un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 10%, con un promedio de minerales oxidados 15% y un grado de resistencia mecánica de 7-8 (Tabla 4). En los afloramientos se observan bandas composicionales plegadas. En E45 se aprecian 2 familias de diaclasa principalmente con alteración de Epidota de color verde.

Figura 26: Fotografías a) Estación 7 Zona 1 (coordenadas X: 1.114.620 Y: 1.267.159 y Z: 1439) y Estación 45 (coordenadas X: 1.115.414 Y: 1.267.702 y Z: 1447) del Intervalo de meteorización III de litología Neis Cuarzo Feldespático, Las líneas punteadas representan los planos de foliación y las continuas las diaclasas.



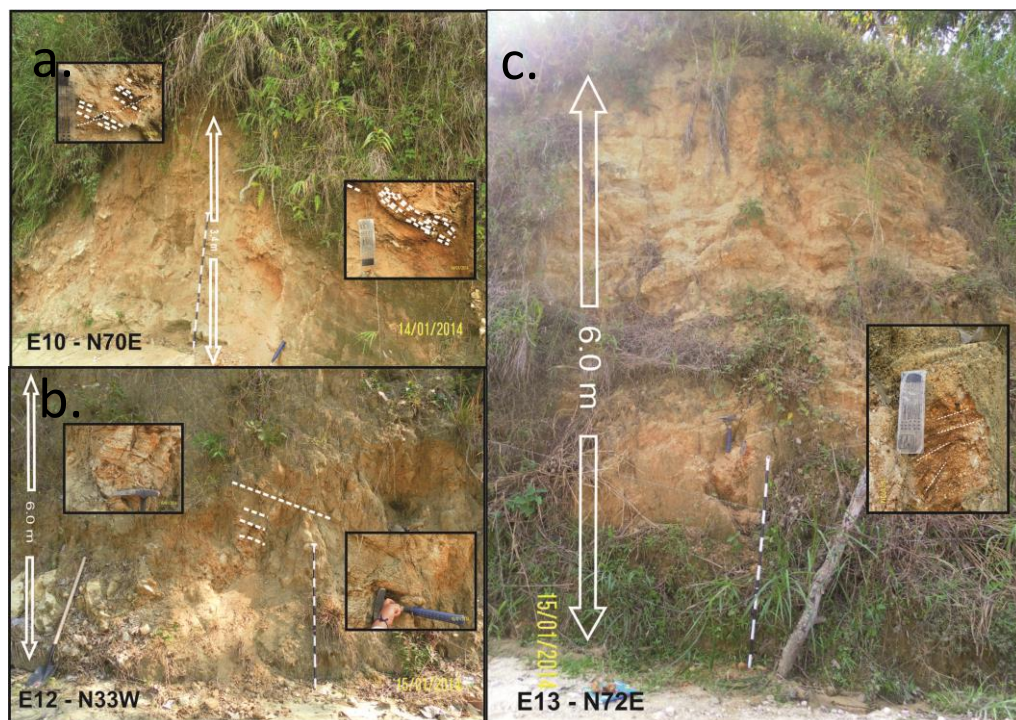
7.1.1.4 Intervalo IV – Roca altamente meteorizada. Corresponde a las estaciones E3, E4, E7, E9, E14, E34, E37, E41 y E61: Neis Cuarzo Feldespático de coloración 10YR 7/6 YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de fino - muy grueso (0.125- 2 mm), presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 22%, con un promedio de minerales oxidados de 28.75 % y un grado de resistencia mecánica de 5-6 (Tabla 4). En los afloramientos se observan bloques sub-angulares y redondeados entre 40-60 cm aproximadamente, conservando planos de foliación en la matriz arcillosa además de fracturas rellenas de material arenoso.

Figura 27: en las fotografías a) Estación 3 (coordenadas X: 1.113.948 Y: 1.267.412 y Z: 1.273), b) estación 4 (coordenadas X: 1.114.164 Y: 1.267.383 y Z: 1.346), c) estación 14 (coordenadas X: 1.114.812 Y: 1.267.643 y Z: 1.516) y d) estación 37 (coordenadas X: 1.113.788 Y: 1.269.495 y Z: 1.384), del Intervalo de meteorización IV de litología Neis Cuarzo Feldespático, las líneas punteadas representan los planos de foliación.



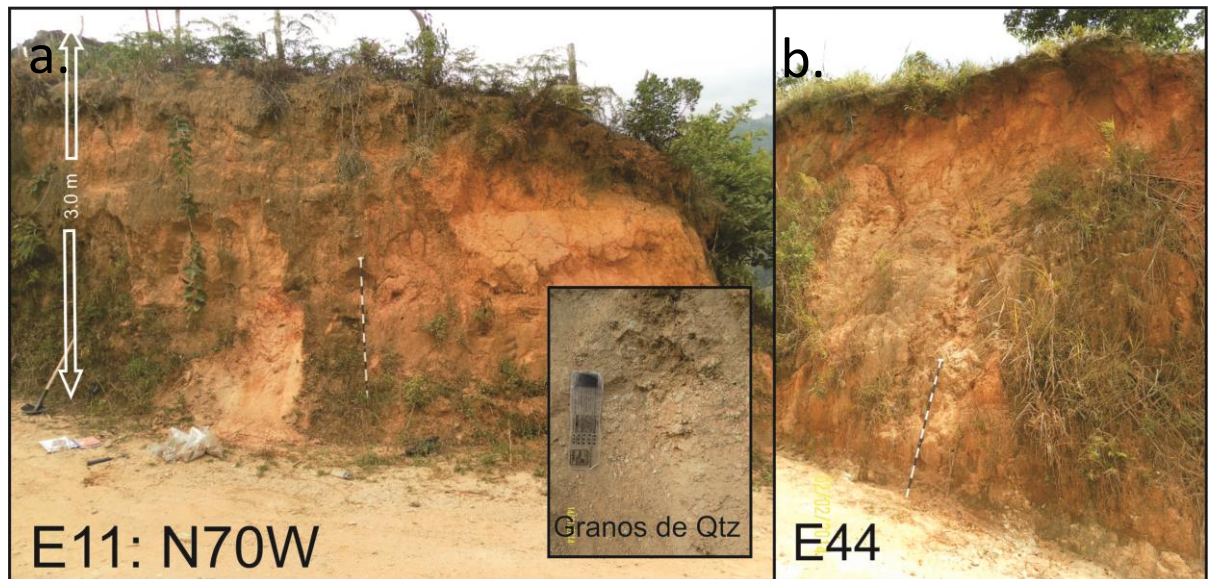
7.1.1.5 Intervalo V – Roca completamente meteorizada. Corresponde a las estaciones E7, E10, E12, E13, E17, E33, E41 y E61: Neis Cuarzo Feldespático, de color 10YR 7/8 YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de fino - muy grueso (0.125- 2 mm), presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 44%, con un porcentaje de minerales oxidados 40.55% y un grado de resistencia mecánica de 3-4 (Tabla 4). En los afloramientos se observan venas de cuarzo fracturadas, las bandas melanocráticas del Neis son las que se encuentran más alteradas y con colores anaranjados propios de la oxidación de minerales, el espaciado entre las fracturas es menor a 10 cm. En ocasiones se conserva la estructura de la roca original, al presentar un grado de resistencia mecánica bajo, el material se disgrega con la mano, en algunas fracturas se observan costras o carchas de oxidación.

Figura 28: Fotografías a) Estación 10 (coordenadas X: 1.114.538 Y: 1.267.523 Z: 1.411), b) Estación 12 (coordenadas X: 1.114.657, Y: 1.1267.690 y Z: 1540) y c) Estación 13 (coordenadas X: 1.114.785, Y: 1.267.906 y Z: 1.448) del Intervalo de meteorización V de litología Neis Cuarzo Feldespático. Las líneas punteadas representan los planos de foliación de la roca original.



7.1.1.6 Intervalo VI – Suelo residual. Corresponde a las estaciones E11, E14 Parte superior, y E44: Horizonte Laterítico según Dewandel (2006), de color 7,5YR 8/6 REDDISH YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de Muy fino - muy grueso y megacrístales de 0,6-1,3 cm. El material se encuentra disgregado, presenta un promedio de minerales arcillosos de 66%, con un porcentaje de minerales oxidados de 47.5% y un grado de resistencia mecánica de 1-2 (Tabla 4). En los afloramientos la oxidación se presenta de manera zonificada, en la parte superior al corte se aprecia la zona edáfica además de galería y restos vegetales, los granos de cuarzo son aislados en una matriz arcillosa, en este intervalo no se aprecian fracturas ni planos de foliación predominantes. En pequeñas zonas se conserva la foliación de la roca original.

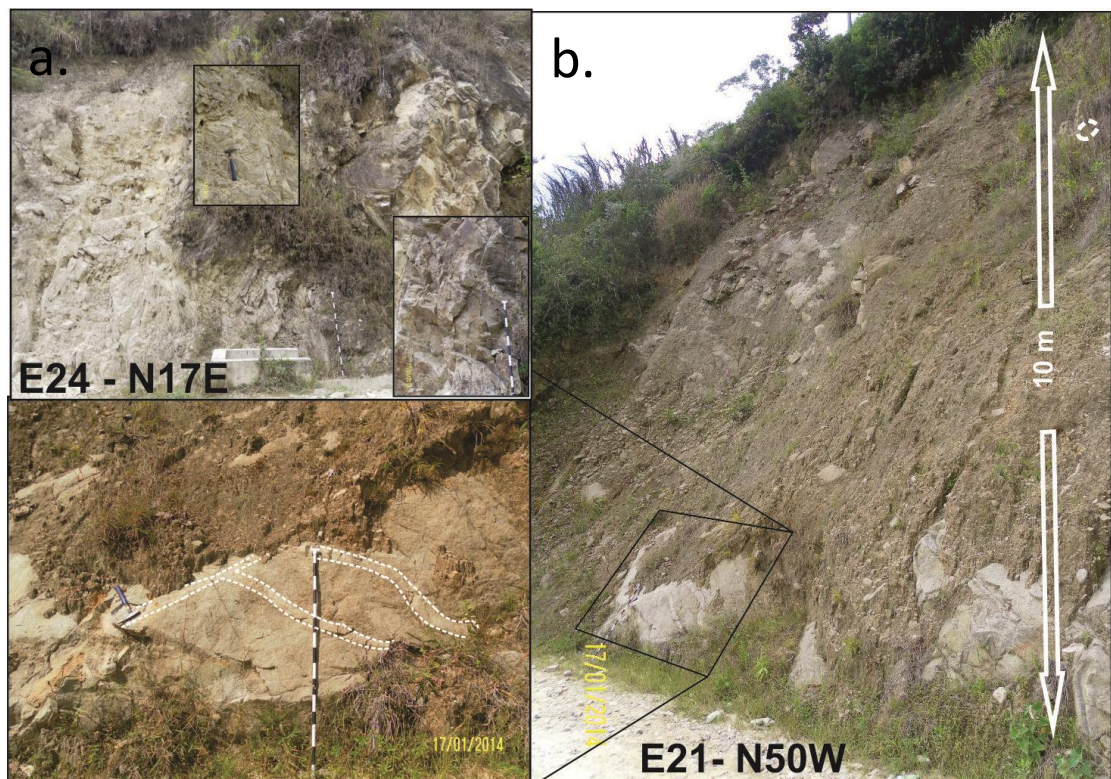
Figura 29: Fotografías a) Estación 11 (coordenadas X: 1.114.851 Y: 1.267.690 y Z: 1.540) y b) Estación 44 (coordenadas X: 1.115.296 Y: 1.267.864 y Z: 1.491) del Intervalo de meteorización VI de litología Neis Cuarzo Feldespático.



7.1.2 Perfil de roca ígnea

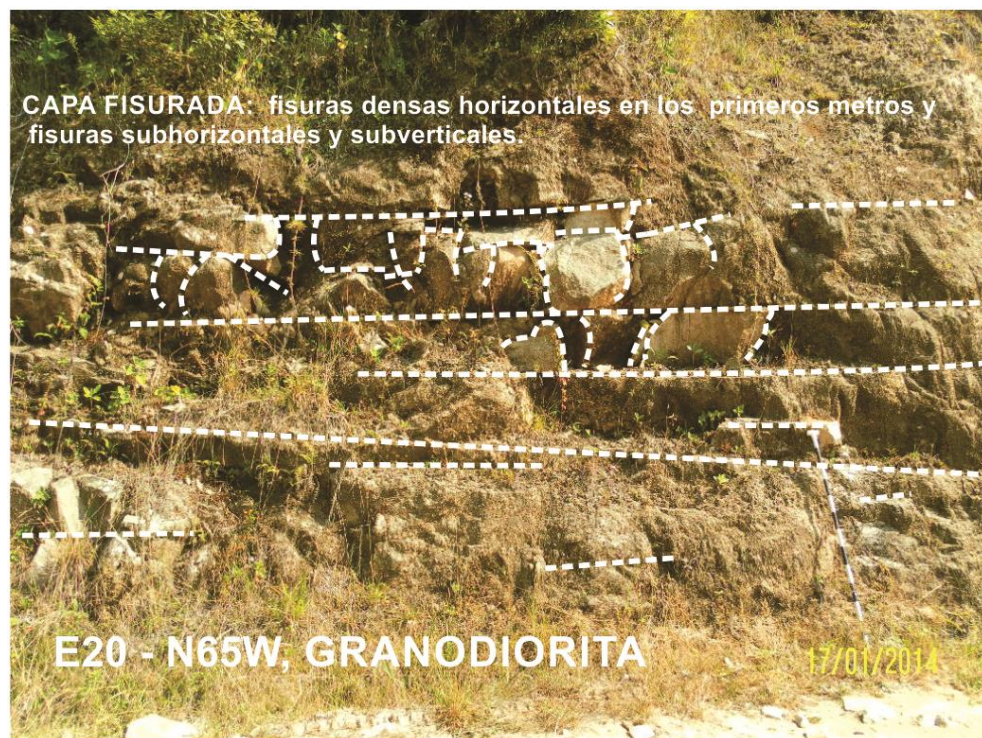
7.1.2.1 Intervalo I – Roca Fresca. Corresponde a las estaciones E15, E22, E46: Monzogranito, E21 y E24: Granodiorita. E6: Cuarzomonzonita la cual solo se observa en la zona de estudio como roca fresca, perteneciendo a este intervalo únicamente; el color es 2,5YR 8/6 YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de fino - muy grueso con megacrístales y Fenocrístales, porcentaje promedio de minerales arcillosos de 8%, porcentaje promedio de oxidación de minerales de 11.1% y un grado de resistencia mecánica de 10 (Tabla 4). Se aprecian bloques sud-redondeados aproximadamente de 4.5 x 3 m, y otros de 10 a 20 cm, fracturas cerradas, abiertas y otras que han sido rellenas de material disgregado, altamente diaclasado.

Figura 30: Fotografías a) Estación 24 (coordenadas X: 1.117.173 Y: 1.267.750 y Z: 2047) y b) Estación 21 (coordenadas X: 1.117.674 Y: 1.268.912 y Z: 2.170) de composición Granodiorítica, pertenecen al intervalo de meteorización I del perfil de roca ígnea.



7.1.2.2 Intervalo II – Roca ligeramente meteorizada. Corresponde a las estaciones E22': Monzogranito, E20: Granodiorita, E42: Diorita, de color 2,5 YR 8/4 POLE YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de medio - muy grueso. Presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 10%, porcentaje promedio de Oxidación de minerales de 11.3% y un grado de resistencia mecánica de 9 (Tabla 4).

Figura 31: Estación 20 (coordenadas X: 1.117.860, Y: 1.269.231 y Z: 2.225) en la cual se observaron densas fracturas cerradas horizontales en los primeros metros con azimuth de rumbo 125/16, con un espaciado de 45 cm y fisuras subhorizontales y subverticales, esta última abierta, con dirección 229/59 y con un espaciado de 90 cm entre ellas; típicas del intervalo II en el perfil de meteorización (Dewandel et al 2006). Estas fracturas permiten la formación de bloques subredondeados de 70 x 60 cm.

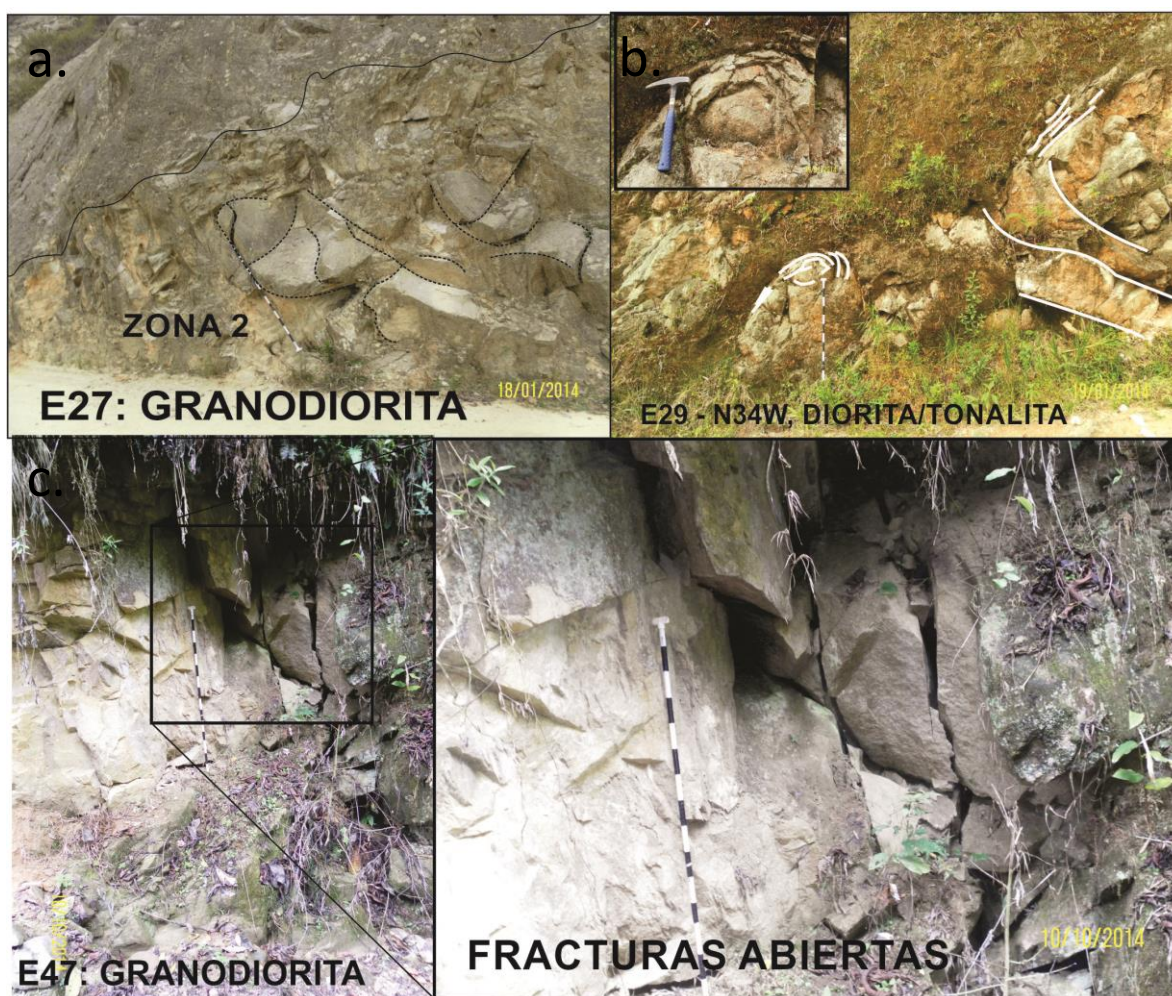


7.1.2.3. Intervalo III – Roca moderadamente meteorizada

Corresponde a las estaciones E15, E19, **E27 ZONA 2** y E47: Granodiorita y E31: Diorita, de color 2,5YR 8/4 POLE YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que

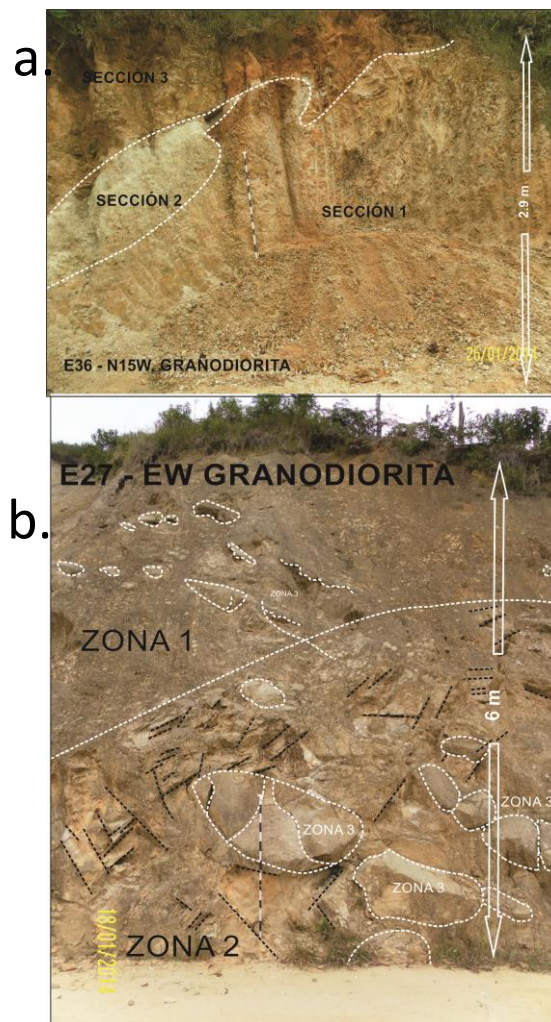
varían de muy fino - muy grueso. Presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 15%, con porcentaje promedio de oxidación de minerales de 14% y un grado de resistencia mecánica de 7 y 8 (Tabla 4).

Figura 32: fotografías a) Estación 27 zona 2 roca Granodiorítica (coordenadas X: 1.118.534, Y: 1.1270.156 y Z: 2.345), b) estación 29 roca Diorita/ Tonalita (coordenadas X: 1.117,616 Y: 1.269.168 y Z: 2191) y c) estación 47 (coordenadas X: 1.116.141, Y: 1.269.811 y Z: 1743). En la Estación 27 zona 2 se observan algunas fracturas abiertas y la presencia de algunos nódulos o cascarones; típicos del Intervalo III del perfil de meteorización. (Dewandel et al 2006).



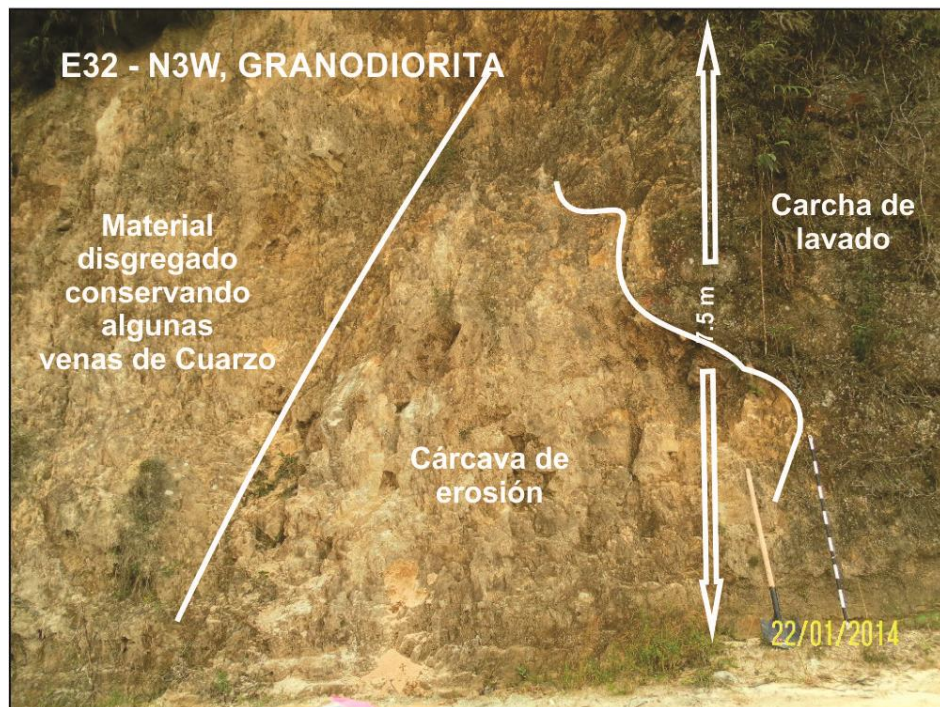
7.1.2.4. Intervalo IV – Roca altamente meteorizada. Corresponde a las estaciones E27 ZONA 1 y E36: Granodiorita, de color 7,5YR 7/6 REDDISH YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de fino-grueso. Presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 30%, con porcentajes promedio de oxidación de minerales de 46% y un grado de resistencia mecánica de 5 y 6 (Tabla 4).

Figura 33: Estación 27 Zona 1 (coordenadas X: 1.118.534, Y: 1.1270.156 y Z: 2.345) y 36 sección 1 (coordenadas X: 1.113., 885 Y: 1.1269.489 y Z: 1.393), representan al intervalo IV de meteorización de roca ígnea. En la estación 27 zona 1, presenta mayor densidad de fracturas que la zona 2 del mismo afloramiento, la estación 36 sección 1 presenta fuerte diaclasamiento y bloques de 5 - 10 cm y menores de 5 cm.



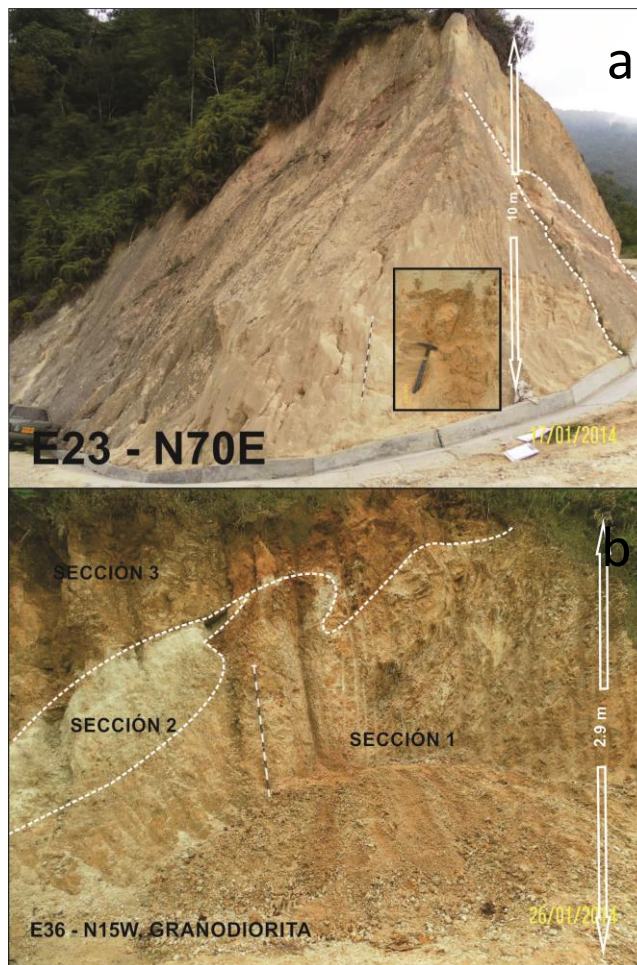
7.1.2.5 Intervalo V – Roca completamente meteorizada. Corresponde a las estaciones E32, E60: Granodiorita, E42: Diorita, de color 7,5YR 8/6 REDDISH YELLOW (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de muy fino-grueso. Presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 36%, un porcentaje promedio de oxidación de minerales de 25% y un grado de resistencia mecánica de 3 y 4 (Tabla 4).

Figura 34: Estación 32 (coordenadas X: 1.117.393, Y: 1.1267.346 y Z: 1.929), Intervalo de meteorización V en el perfil de roca Granodiorítica, se observan cárcavas de erosión y algunas venas de cuarzo fracturadas, no se observan planos de diaclasas definidos además se ha perdido la coloración de la roca original.



7.1.2.6. Intervalo VI – Suelo residual. Corresponde a las estaciones E22': Monzogranito, E21, E23 y E36: Granodiorita, suelo residual de coloración 7,4YR 8/4 PINK (Tabla 3), con tamaños de grano que varían de muy fino-grueso, presenta un porcentaje promedio de minerales arcillosos de 62%, con porcentaje promedio de oxidación de minerales de 62% y un grado de resistencia mecánica de 1 y 2 (Tabla 4).

Figura 35: Fotografías a) Estación 23 (coordenadas X: 1.117.583 Y: 1.1268.092 y Z: 2.098), y b) estación 36 sección 3 (coordenadas X: 1.113., 885 Y: 1.1269.489 y Z: 1.393), La estación 23: Intervalo de meteorización VI en el perfil de roca Granodiorítica, no presenta familias de diaclasas, ni bloques o cascarones además ya se ha perdido la coloración de la roca original, en la estación 36 sección 3, no se observan bloques, pero si minerales dentro de una matriz arcillososa, se siente húmedo al tacto.



7.2 DEFINICIÓN DEL PERFIL DE METEORIZACIÓN NÉISICO Y GRANODIORÍTICO.

Después de establecer las estaciones que pertenecen a cada intervalo de meteorización tanto Ígneo como Metamórfico, se definió una estación o afloramiento representativo para cada intervalo de meteorización, teniendo en cuenta propiedades físicas y los datos obtenidos mediante rebote, tomados con el martillo de Schmidt, en salida de campo, para el perfil de roca Néisica y Granodiorítica (Tabla 5).

TABLA 5: Valores de resistencia mecánica, tomados con el martillo de Schmidt, en Roca Néisica, (parte superior de la tabla) y en Roca Granodiorítica (parte inferior de la tabla) para cada uno de los intervalos de meteorización, los cinco valores más bajos en cada intervalo, se descartaron al realizar el promedio correspondiente.

PERFIL DE METEORIZACIÓN: ROCA NÉISICA																	
INTERVALO	Est.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Promedio
VI	11	16	0	14	14	5	16	0	14	16	15	0	14	0	16	14	14,9
V	10	16	15	0	15	16	0	15	12	0	14	14	16	0	15	16	15,2
IV	3	28	28	24	24	26	25	28	28	27	24	30	28	24	24	24	27,2
III	7	14	14	18	14	12	12	18	13	12	16	12	14	14	16	16	15,3
II	26	26	44	30	40	40	36	36	42	40	38	42	46	38	32	18	40,6
I	1	40	50	42	43	36	47	50	36	52	46	40	43	48	50	38	46,5
PERFIL DE METEORIZACIÓN: ROCA GRANODIORÍTICA																	
INTERVALO	Est.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Promedio
VI	23	12	14	0	0	0	13	14	14	0	0	0	12	14	14	0	10,7
V	32	14	0	0	14	15	14	0	16	0	0	13	0	0	14	15	11,5
IV	27 zona 1	16	14	20	20	22	20	22	20	24	24	24	18	21	22	21	22
III	27 zona 2	48	38	34	40	46	40	40	42	42	40	30	34	38	30	40	41,6
II	20	26	22	32	26	30	26	26	28	24	24	24	26	25	26	28	27,4
I	24	45	28	36	48	32	32	44	52	48	38	44	42	48	48	46	46,5

En la Tabla 6, se observan las estaciones que representan el perfil de roca metamórfica, estas hacen parte del Neis de Bucaramanga, ya que es la unidad de la cual se encontraron todos los intervalos de meteorización y que abarca mayor

extensión en la zona de estudio y las estaciones que representan el perfil de meteorización de roca Ígnea, estas hacen parte del pulso Granodiorítico quien es la unidad de la cual se encontraron todos los intervalos de meteorización.

TABLA 6: Representación de cada uno de los análisis físico-químicos aplicados a las diferentes muestras, como se observa en la tabla parte superior perfil de meteorización Néisico, parte inferior perfil de roca Granodiorítica.

PERFIL DE METEORIZACIÓN NÉISICO	N° DE MUESTRA GRANULOMETRÍA	N° DE MUESTRA SEM / FLUORESCENCIA DE RAYOS X	N° DE MUESTRA HUMEDAD RELATIVA	N° DE MUESTRA SECCIÓN DELGADA: PETROGRAFÍA	N° DE MUESTRA POROSIDAD
E11: INTERVALO VI	ACM-05-11-55/58	ACM-05-11-57	ACM-05-11-54	ACM-VI-11-17	ACM-VI-11-18
E10: INTERVALO V	ACM-05-10-52/53	ACM-05-10-51	ACM-V-10-22	ACM-05-10-48	ACM-V-10-20
E3: INTERVALO IV	ACM-12-03-202	ACM-12-03-200	ACM-12-03-201	ACM-02-03-13	ACM-IV-03-27
E7 SECCION 1: INTERVALO III	ACM-04-07-33	ACM-04-07-33	ACM-III-07-25	ACM-04-07-28	ACM-III-07-24
E26: INTERVALO II	ACM-09-26-110	ACM-09-26-110	ACM-II-26-03	ACM-II-26-01	ACM-II-26-04
E1: INTERVALO I	ACM-12-01-209	ACM-01-01-03	ACM-12-01-207	ACM-I-01-30	ACM-I-01-29
PERFIL DE METEORIZACIÓN GRANODIORÍTICO	N° DE MUESTRA GRANULOMETRÍA	N° DE MUESTRA SEM / FLUORESCENCIA DE RAYOS X	N° DE MUESTRA HUMEDAD RELATIVA	N° DE MUESTRA SECCIÓN DELGADA: PETROGRAFÍA	N° DE MUESTRA POROSIDAD
E23: INTERVALO VI	AC-11-23-173	AC-11-23-172	AC-VI-23-10	AC-VI-23-09	AC-VI-23-12
E32: INTERVALO V	AC-12-32-191/188	AC-12-32-189	AC-V-32-16	AC-12-32-187	AC-V-32-15
E27 ZONA 1: INTERVALO IV	AC-09-27-116	AC-09-27-114	AC-09-27-113	AC-09-27-112	AC-IV-27-08
E27 ZONA 2 R: INTERVALO III	AC-09-27-120/121	AC-09-27-122	AC-09-27-119	AC-09-27-118	AC-III-27-06
E20: INTERVALO II	AC-II-20-36	AC-II-20-37	AC-II-20-35	AC-II-20-32	AC-II-20-34
E24 PARTE DERECHA: INTERVALO I	AC-11-24-179	AC-11-24-178	AC-11-24-177	AC-11-24-176	AC-II-24-13

7.2.1 Secuencia de los intervalos de meteorización mediante propiedades físicas observadas en Muestras de mano. Análisis petrográfico basado en las características físicas como coloración, minerales arcilla, Oxidación de minerales y el grado de compactación o resistencia mecánica, el cual permitió desarrollar una representación de cada etapa de meteorización para el Neis de Bucaramanga y roca Granodiorítica. Figura 36.

Figura 36: Transición de cada uno de los intervalos de meteorización, mediante propiedades físicas, tanto para el Perfil Granodiorítico como para el perfil Néisico.



7.2.2. Espesores y Columna generalizada. Para la realización de la columna generalizada del perfil Neísico (Figura 37) y perfil Granodiorítico (Figura 38) se tuvieron en cuenta la suma de los espesores de todos los afloramientos que pertenecen a las respectivas litologías. Como se muestra en la Tabla 7. El espesor total del perfil de Roca Neísica es de 90.4 m, siendo el intervalo V el que presenta mayor espesor con 27.9 m. Para el perfil de roca Granodiorítica el espesor total es de 68.5 m, siendo el intervalo V el de mayor espesor con 16 m. Para ambos perfiles de meteorización el intervalo V representa aproximadamente un tercio de todo el perfil.

TABLA 7: Espesores determinados por las estaciones de campo de cada una de las litologías (Granodiorita - Superior, Neis – Inferior).

INTERVALOS DE METEORIZACIÓN GRANODIORÍTICO	ESTACIÓN	ESPESOR (metros)	ESPESOR POR INTERVALOS
I	E21	10	14.5
	E24	4.5	
II	E20	4.5	4.5
III	E19	7.5	15.5
	E27 ZONA 2	3	
	E47	5	
IV	E27 ZONA 1	3	6
	E36	3	
V	E32	7.5	16
	E35	4.5	
	E60	4	
VI	E23	10	12
	E36	2	
TOTAL		68.5 metros	
INTERVALOS DE METEORIZACIÓN NÉISICO	ESTACIÓN	ESPESOR (METROS)	ESPESOR INTEVALO
I	E1	4.5	11.5
	E9	7	
II	E25	3	6
	E26	3	
III	E7 ZONA 1	3	10
	E9	1	
	E45	6	
IV	E3	4.5	22.5
	E4	4.5	
	E7 ZONA 3	1.5	
	E9	1	
	E14	2	
	E37	3	
	E41	2	
E61	4		
V	E10	3.4	27.9
	E12	6	
	E13	6	
	E17	3	
	E33	3.5	
	E41	2	
VI	E61	4	12.5
	E11	3	
	E14	2.5	
	E44	7	
TOTAL		90.4 metros	

Figura 37: Columna generalizada del perfil de roca Néisica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Planos de foliación, bandas composicionales y fracturas en menor proporción, Intervalo II: incremento en la densidad de fracturas, Intervalos III: Bandas composicionales plegadas, Intervalo IV: Presencia de bloques sub-angulares y redondeados, Intervalo V: Granos de cuarzo en una matriz arcillosa e Intervalo VI: Materia orgánica, galerías y restos vegetales.

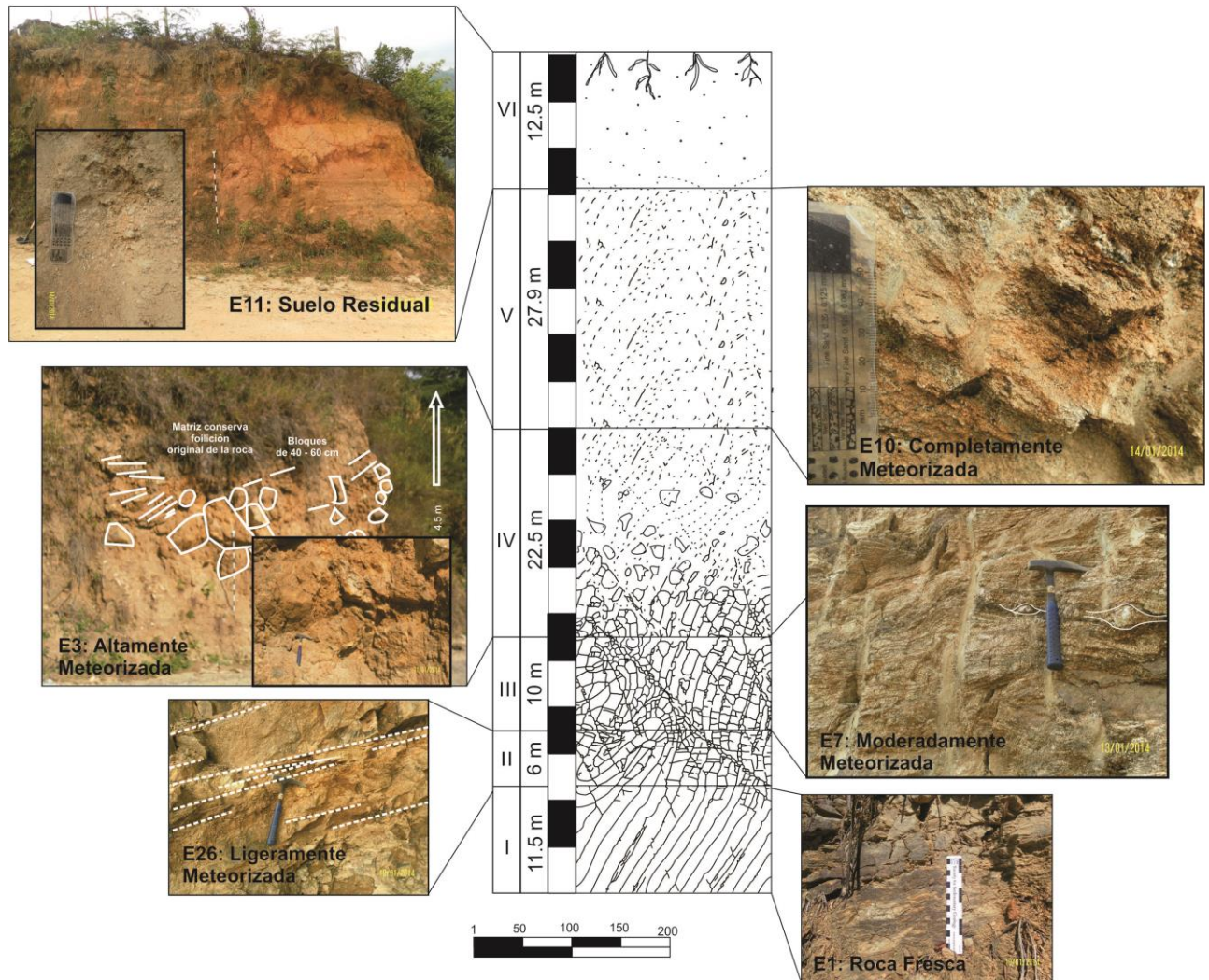
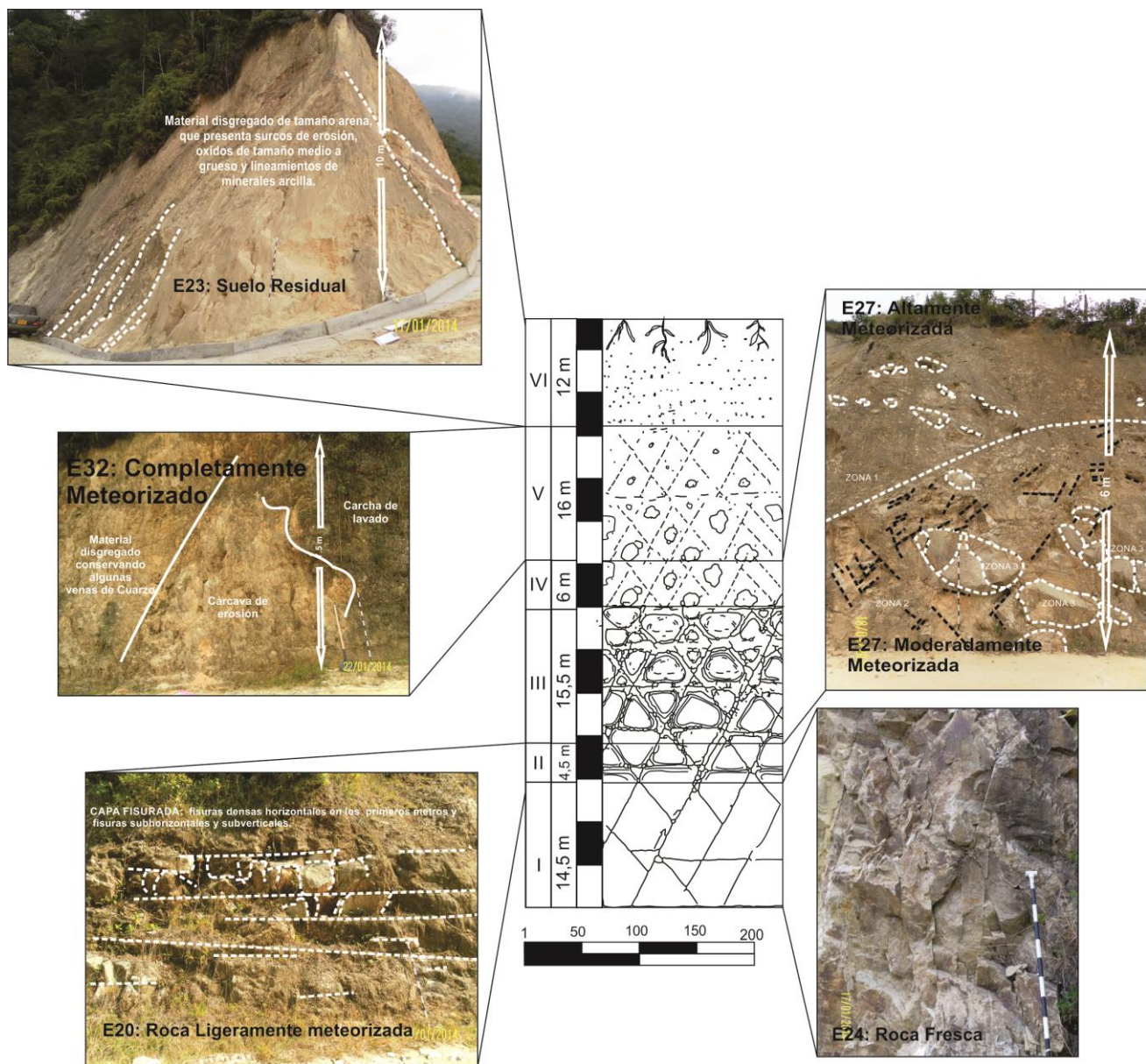


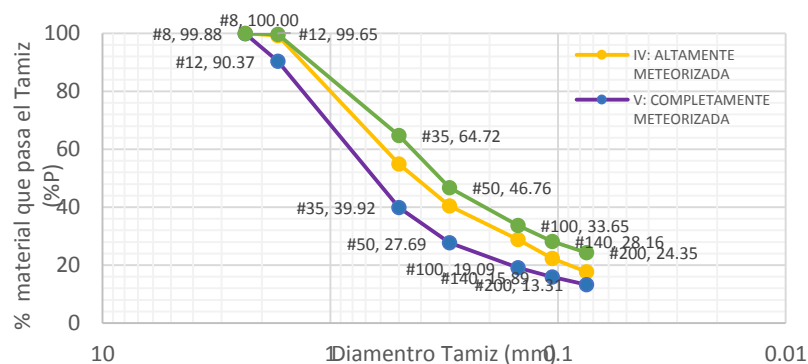
Figura 38: Columna generalizada del perfil de roca Granodiorítica, a escala real (espesores de cada uno de los intervalos de meteorización, tomados en campo), rasgos representativos, Intervalo I: Altamente diaclasado, Intervalo II: Fisuras Sub-horizontales y sub-verticales en mayor densidad, Intervalos III: presencia de fracturas esferoidales (cascarones o nódulos), Intervalo IV: la densidad de bloques y/o cascarones disminuye con respecto al intervalo III de meteorización, Intervalo V: Algunas venas de Cuarzo se conservan pero éstas están altamente fracturadas e Intervalo VI: los minerales se encuentran en una matriz de grano fino.



7.2.3 Curva Granulométrica. El análisis granulométrico, brinda la oportunidad de observar la distribución del tamaño de los granos de roca y su variación con el aumento de la meteorización a partir del intervalo IV: Roca altamente meteorizada, en el cual la roca empieza a comportarse como un depósito de roca no consolidada, teniendo en cuenta que la meteorización física y química altera las propiedades de los minerales, adicionalmente la granulometría presenta una relación importante con las propiedades hidrogeológicas, como la Permeabilidad y la Porosidad. Para el presente estudio se realizó este análisis para cada uno de los intervalos de meteorización de los diferentes perfiles.

Para los datos arrojados de las muestras pertenecientes al perfil de Meteorización de roca Granodiorítica (Tabla 8 inferior y Figura 39) el intervalo de roca altamente meteorizada (Intervalo IV), presenta predominancia de granos con tamaño aproximado de 0.5 mm - 2 mm, aumentando hasta la roca Completamente Meteorizada (Intervalo V) la cual alcanza a contener cerca del 50% del tamaño de los granos correspondiente a arenas gruesas y muy gruesas (Cruz y Caballero, 2007), pero luego en el intervalo VI que corresponde al Suelo Residual esta predominancia disminuye a 35% de los granos.

Figura 39: Curva Granulométrica perfil Granodiorítico



Con respecto a los finos durante el desarrollo del perfil de meteorización de roca Granodiorítica no superan el 25%, siendo el intervalo VI el que presenta el mayor contenido con un 24.35% de granos tamaño limo y arcilla.

TABLA 8: Datos de los porcentajes retenidos en cada uno de los tamices; el perfil de roca Néisica observado en la parte superior de la tabla, perfil de roca Granodiorítica parte inferior de la misma.

PERFIL DE METEORIZACION ROCA NEISICA																			
N° Tamiz	*Diámetro Tamiz (mm)	I: ROCA FRESCA			II: LIGERAMENTE METEORIZADA			III: MODERAMENTE METEORIZADA			IV: ALTAMENTE METEORIZADA			V: COMPLETAMENTE METEORIZADA			VI: SUELO RESIDUAL		
		% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P
8	2.36	3.00	3.00	96.99	1.18	1.18	98.82	7.12	7.12	92.88	2.07	2.07	97.93	0.94	0.94	99.06	0.46	0.46	99.54
12	1.7	3.97	6.97	93.02	3.74	4.92	95.08	12.42	19.54	80.46	2.55	4.62	95.38	1.43	2.37	97.63	1.24	1.70	98.30
35	0.5	39.41	46.38	53.62	38.76	43.68	56.32	55.42	74.96	25.04	44.44	49.06	50.94	33.83	36.21	63.79	32.67	34.37	65.63
50	0.3	16.18	62.56	37.44	12.77	56.45	43.55	11.53	86.50	13.50	18.97	68.03	31.97	18.07	54.27	45.73	12.30	46.67	53.33
100	0.15	13.20	75.76	24.24	11.55	68.00	32.00	7.72	94.21	5.79	15.20	83.23	16.77	19.32	73.59	26.41	9.71	56.38	43.62
140	0.106	5.65	81.40	18.59	6.03	74.03	25.97	2.22	96.43	3.57	5.61	88.84	11.16	8.93	82.52	17.48	9.11	65.49	34.51
200	0.075	5.03	86.43	13.56	5.50	79.54	20.46	1.37	97.80	2.20	3.59	92.43	7.57	5.92	88.45	11.55	5.78	71.27	28.73
> 200	-	13.57	100.00	0.00	20.46	100.00	0.00	2.20	100.00	0.00	7.57	100.00	0.00	11.55	100.00	0.00	28.73	100.00	0.00
PERFIL DE METEORIZACION ROCA GRANODIORITICA																			
N° Tamiz	*Diámetro Tamiz (mm)	I: ROCA FRESCA			II: LIGERAMENTE METEORIZADA			III: MODERADAMENTE METEORIZADA			IV: ALTAMENTE METEORIZADA			V: COMPLETAMENTE METEORIZADA			VI: SUELO RESIDUAL		
		% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P	% R	%ΣR	% P
8	2.36	0.18	0.18	99.82	0.70	0.70	99.30	0.20	0.20	99.80	0.01	0.01	99.99	0.12	0.12	99.88	0.00	0.00	100.00
12	1.7	1.13	1.31	98.69	1.88	2.58	97.42	0.17	0.37	99.63	0.75	0.76	99.24	9.51	9.63	90.37	0.35	0.35	99.65
35	0.5	25.73	27.04	72.96	29.89	32.47	67.53	25.03	25.40	74.60	44.31	45.07	54.93	50.45	60.08	39.92	34.93	35.28	64.72
50	0.3	16.13	43.17	56.83	14.04	46.51	53.49	19.69	45.09	54.91	14.46	59.53	40.47	12.23	72.31	27.69	17.96	53.24	46.76
100	0.15	16.95	60.11	39.89	21.02	67.53	32.47	17.93	63.01	36.99	11.58	71.12	28.88	8.60	80.91	19.09	13.11	66.35	33.65
140	0.106	10.84	70.96	29.04	8.31	75.84	24.16	12.97	75.99	24.01	6.52	77.63	22.37	3.19	84.11	15.89	5.49	71.84	28.16
200	0.075	8.33	79.29	20.71	6.06	81.90	18.10	8.25	84.23	15.77	4.66	82.29	17.71	2.58	86.69	13.31	3.81	75.65	24.35
> 200		20.71	100.00	0.00	18.10	100.00	0.00	15.77	100.00	0.00	17.71	100.00	0.00	13.31	100.00	0.00	24.35	100.00	0.00

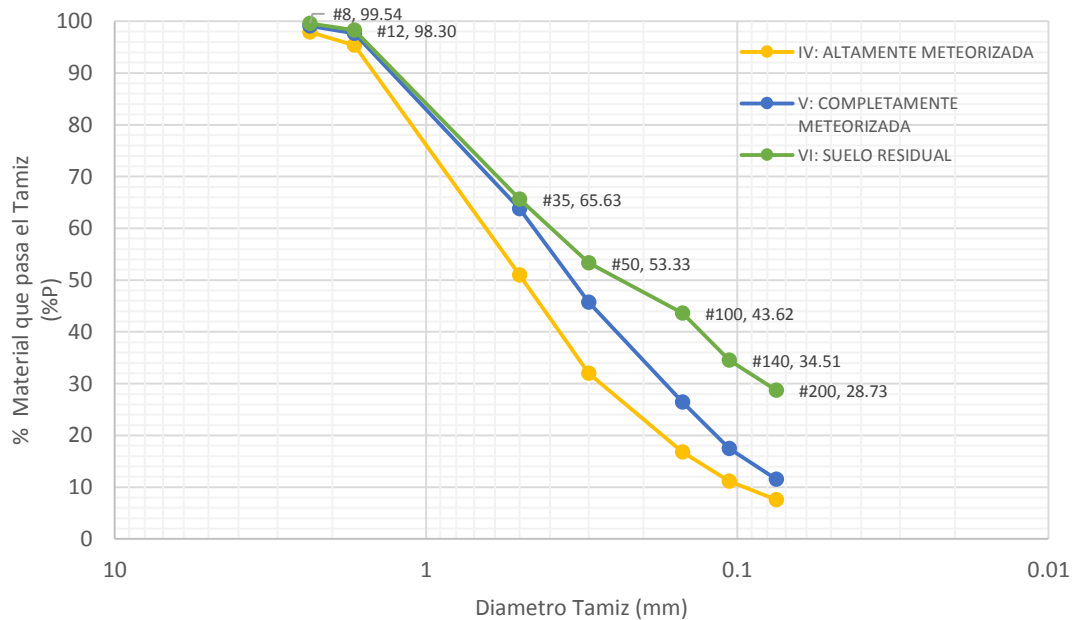
*Tomado de la Norma ASTM E-11-70;

%R: % Retenido en el Tamiz; %ΣR: % Retenido en el Tamiz acumulado; %P: % que Pasa el Tamiz.

Para el perfil de meteorización de Roca Néisica (Tabla 8 superior y Fig. 40), la curva granulométrica muestra que los tamaños de grano limo-arcilla aumentan a medida que el grado meteorización aumenta, llegando a valores cercanos al 30%.

El tamaño de grano predominante para todo el perfil es Arena Gruesa y muy gruesa (0.5 mm -2.0 mm) pasando de tener un porcentaje máximo de 55% en el intervalo III correspondiente a moderadamente meteorizado, pero en el intervalo VI: Suelo Residual disminuye aproximadamente al 33% del tamaño de grano. Los valores encontrados en el intervalo III no se tienen en cuenta ya que presentan un grado de resistencia mecánica alto y el análisis granulométrico pudo haberse alterado, así que solo se tiene en cuenta los datos obtenidos a partir del intervalo IV, ya que la meteorización hace que estos intervalos se comporten como depósitos de roca no consolidados. (Dewandel, 2006). Para estos tres intervalos el que presenta mayor porcentaje de tamaño de grano arena gruesa- muy gruesa es el intervalo IV, con un valor cercano al 45%, que va disminuyendo hasta un 33% en el intervalo VI.

Figura 40: Curva Granulométrica perfil néisico



7.2.4 Porcentaje de Humedad Relativa en los diferentes perfiles de meteorización. La aplicación práctica de la determinación del contenido de agua en una muestra de roca, definiéndose como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", y la masa de las partículas sólidas en la muestra; tiene como fin conocer el peso del agua removida secada usando un horno controlado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) durante 24 horas. El peso de la muestra remanente después de secado en el horno, corresponde al peso de las partículas sólidas.

El Grado de meteorización de la roca es una observación importante en cuanto que condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumentan la porosidad, la permeabilidad y la deformabilidad de la roca.⁴

La meteorización física que afecta a la roca metamórfica, genera entre su estructura espacios propicios para que el agua los llene o fluya a través de estos hacia niveles freáticos más bajos, dependiendo de tamaño de grano, la variación de este y la densidad de fracturas en los diferentes intervalos de meteorización van a condicionar al contenido de agua presente en la roca metamórfica o ígnea.

El cálculo que se llevó a cabo para la determinación del porcentaje de humedad relativa en cada una de las muestras que representan a los diferentes intervalos de meteorización es el siguiente:

$$W = \frac{Wh - Ws}{Ws - Wr} * 100$$

Donde:

W = Contenido de agua %

W_h = Peso del recipiente y del espécimen húmedo, g.

⁴ González et al., 2002, INGENIERÍA GEOLÓGICA, Capítulo 4: Descripción de Macizos Rocosos; Pág. 244

W_s = Peso del recipiente y del espécimen seco, g.

W_r = Peso del recipiente, g.

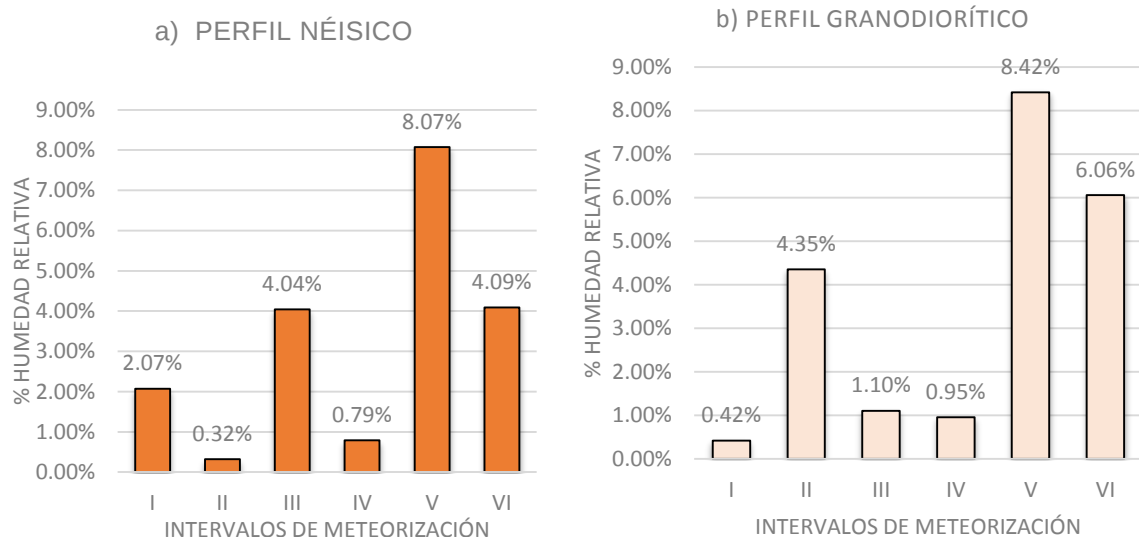
TABLA 9. Datos correspondientes al perfil de roca néisico (parte superior) y roca Granodiorítica (parte inferior), con los cuales se determina el porcentaje de humedad relativa

PRUEBA DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO SECO: PERFIL NÉISICO					
AFLORAMIENTO	MUESTRA EMPLEADA	PESO RECIPIENTE: W_r	PESO HUMEDO: W_h	PESO SECO: W_s	% HUMEDAD: $\frac{W_h - W_s}{W_s - W_r} * 100$
E11: INTERVALO VI	ACM-05-11-54	10	468	450	4,09%
E10: INTERVALO V	ACM-V-10-22	9.8	648,70	601,00	8,07%
E3: INTERVALO IV	ACM-12-03-201	10	520	516	0,79%
E7 SECCIÓN 1: INTERVALO III	ACM-III-07-25	10.09	501,70	482,60	4,04%
E26: INTERVALO II	ACM-II-26-03	12.83	290,70	289,80	0,32%
E1: INTERVALO I	ACM-12-01-207	10	800	784	2,07%
PRUEBA DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO SECO: PERFIL GRANODIORÍTICO					
AFLORAMIENTO	MUESTRA EMPLEADA	PESO RECIPIENTE: W_r	PESO HÚMEDO: W_h	PESO SECO: W_s	% HUMEDAD: $\frac{W_h - W_s}{W_s - W_r} * 100$
E23: INTERVALO VI	AC-VI-23-10	9,8	956,50	897,90	6,60%
E32: INTERVALO V	AC-V-32-16	12,6	827,90	764,60	8,42%
E27 ZONA 1: INTERVALO IV	AC-09-27-113	232	1510	1498	0,95%
E27 ZONA 2: INTERVALO III	AC-09-27-119	306	1408	1396	1,10%
E20: INTERVALO II	AC-II-20-35	10,8	805,30	772,20	4,35%
E24: INTERVALO I	AC-11-24-177 P.	10	968	964	0,42%

Se realiza la determinación del contenido de agua (% de humedad) a 12 muestras de las cuales 6 pertenecen al Neis de Bucaramanga y 6 a la roca Granodiorítica (Tabla 9). En la Figura 41.a, del perfil de roca Néisica se observa que los valores más altos corresponden a los intervalos III, V y VI, siendo la estación 10, la cual representa el intervalo de meteorización V o completamente meteorizado, la que presentan el mayor % de humedad relativa con un 8.07 % y a la cual se le atribuye

hasta un 40% de minerales arcilla (porcentaje determinado mediante análisis de muestras de mano); las cuales se hidratan atrapando en su estructura a moléculas de agua, teniendo así una capacidad de retención alta. La Figura 41.b, del perfil de roca Granodiorítica muestra que los porcentajes más altos de humedad relativa pertenecen a los intervalos de meteorización II, V y VI, siendo la estación 32, la cual representa el grado de meteorización V o completamente meteorizado quien representa el mayor pico con un valor de 8.42 %.

Figura 41: Diagrama de barras para el porcentaje de humedad relativa a) Perfil de roca néisico b) Perfil de roca Granodiorítico.



7.3 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

7.3.1 Análisis petrográfico de Secciones Delgadas.

7.3.1.1 Perfil Néisico. En la TABLA 10 se observa la litología encontrada en cada una de las muestras que representan a cada intervalo de meteorización, las cuales presenta una composición Cuarzo Feldespático asociadas a metamorfismo regional de alto grado; exhiben estructuras Néisicas con dominios de cuarzo-feldespato y dominios de minerales micáceos como biotita-moscovita (las cuales muestran un desarrollo de la foliación S1), localmente augen con desarrollo de porfidoblastos de feldespato potásico (muestra ACM-I-01-30: intervalo I). Las rocas está fuertemente fracturadas a raíz de lo cual desarrolla una porosidad secundaria por fracturamiento. En la Figura 42 se observan las fotomicrografías que representan a los intervalos de meteorización I, II y III, mientras que en la Figura 43 se ilustran los rasgos petrográficos de los intervalos IV, V y VI.

Las rocas metamórficas exhiben una textura lepidogranoblástica y localmente reflejan la probable influencia de metamorfismo dinamotérmico en condiciones dúctiles. La porosidad es de tipo secundario asociada al fracturamiento de la roca, con valores que van desde 0.6 a 19.5%, siendo este último otorgado al intervalo VI de meteorización, localmente están parcialmente rellenas por minerales autigénicos como arcillas, cloritas y óxidos el Cemento está constituido por minerales arcillosos, clorita y cementos opacos de hematita – limonita.

La composición mineralógica (Tabla 9) de estas rocas están representadas principalmente por la presencia de Cuarzo, Feldespato potásico, Plagioclasa, Biotita, Moscovita, como minerales principales, Anfíboles, Granate, Piroxenos y Sillimanita como minerales accesorios y Epidota como mineral de alteración. El Cuarzo se presenta como cristales xenoblásticos, fracturados, incoloros, con colores de interferencia grisáceos de primer orden y extinción ondulosa, están asociados a los feldespatos y biotitas formando micro-bandas. El Feldespato

potásico (Ortoclasa) ocurre en cristales subidioblásticos y xenoblásticos, fracturados, incoloros, colores de interferencia grisáceos de primer orden. Se presenta asociado a Plagioclasa. La Plagioclasa aparece como cristales subidioblásticos y xenoblásticos, incoloros, con colores de interferencia de primer orden, con macla polisintética, afectados por procesos de fracturamiento. La Biotita se presenta como cristales idioblásticos y subidioblásticos, con colores marrones a rojizos, relieve medio-alto, colores de interferencia altos de segundo y tercer orden; en algunas muestras aparece asociado con la moscovita, y por lo general está orientada siguiendo una foliación S1. La Moscovita aparece en forma de cristales subidioblásticos incoloros, de relieve medio, colores de interferencia de segundo orden. La Epidota se observa como cristales xenoblásticos, relieve alto y colores de interferencia altos. Los Anfíboles, se presentan como individuos de colores verdosos en nicoles paralelos, con colores de interferencia de segundo orden y exfoliación en dos direcciones formando ángulos aproximados de 120°. Los Piroxenos, ocurren como individuos incoloros xenoblásticos asilados, de relieve alto, exfoliación en dos direcciones formando ángulos de alrededor de 90°, colores de interferencia altos del segundo al tercer orden. A nivel local aparecen asociados con biotita, cuarzo y óxidos. El Granate se manifiesta como cristales rosáceos en nicoles paralelos, de relieve muy alto y carácter isotrópico. La Silimanita, aparece como cristales incoloros de relieve de alto grado.

Figura 42: Fotomicrografías orientadas (el Norte es indicado por la flecha roja) a 2,5x de las rocas metamórficas; a la izquierda nicols paralelos, a la derecha nicols cruzados. (a) y (b) Intervalo I, ausencia de fracturamiento y textura Lepidogranoblástica, La silimanita se observa en este intervalo, en granos de cuarzo se observó aplastamiento. (c) y (d) Intervalo II, Aparecen Granos de Granate y fábrica apretada debido a la influencia de metamorfismo dinámico. (e) y (f) Intervalo III, levemente alterada a Epidota y a Sericita, con microfracturas que atraviesan la roca, así como otras en el espacio intergranular.

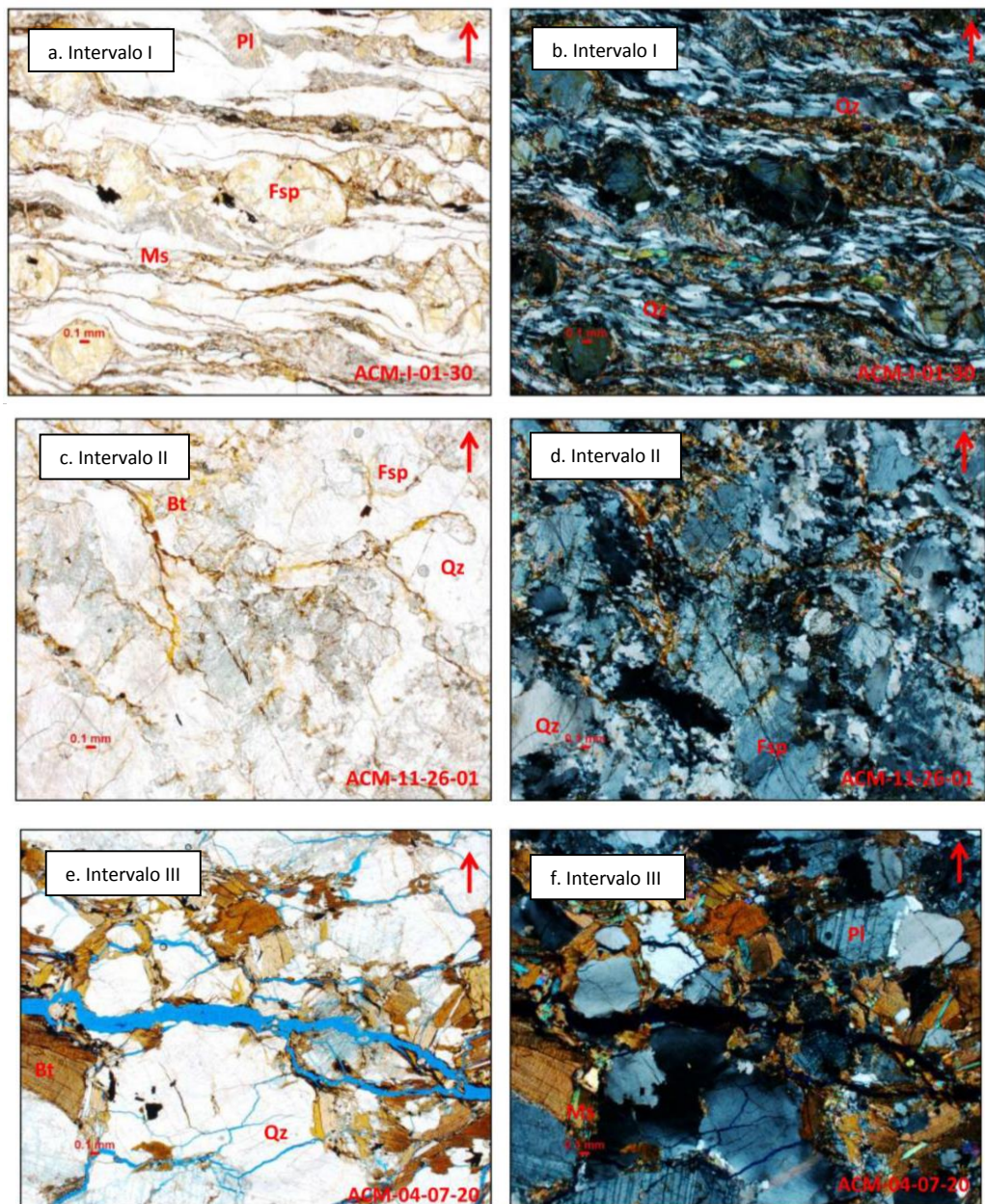


Figura 43: Fotomicrografías orientadas (el Norte es indicado por la flecha roja) a 2,5x en nicols paralelos y cruzados de las rocas metamórficas analizadas mediante petrografía (a) y (b) Intervalo IV, textura Lepidogranoblástica y que a medida que aumenta la meteorización ésta desaparece. (e) y (f) Intervalo VI, alteración química de minerales y el aumento del micro-fracturamiento.

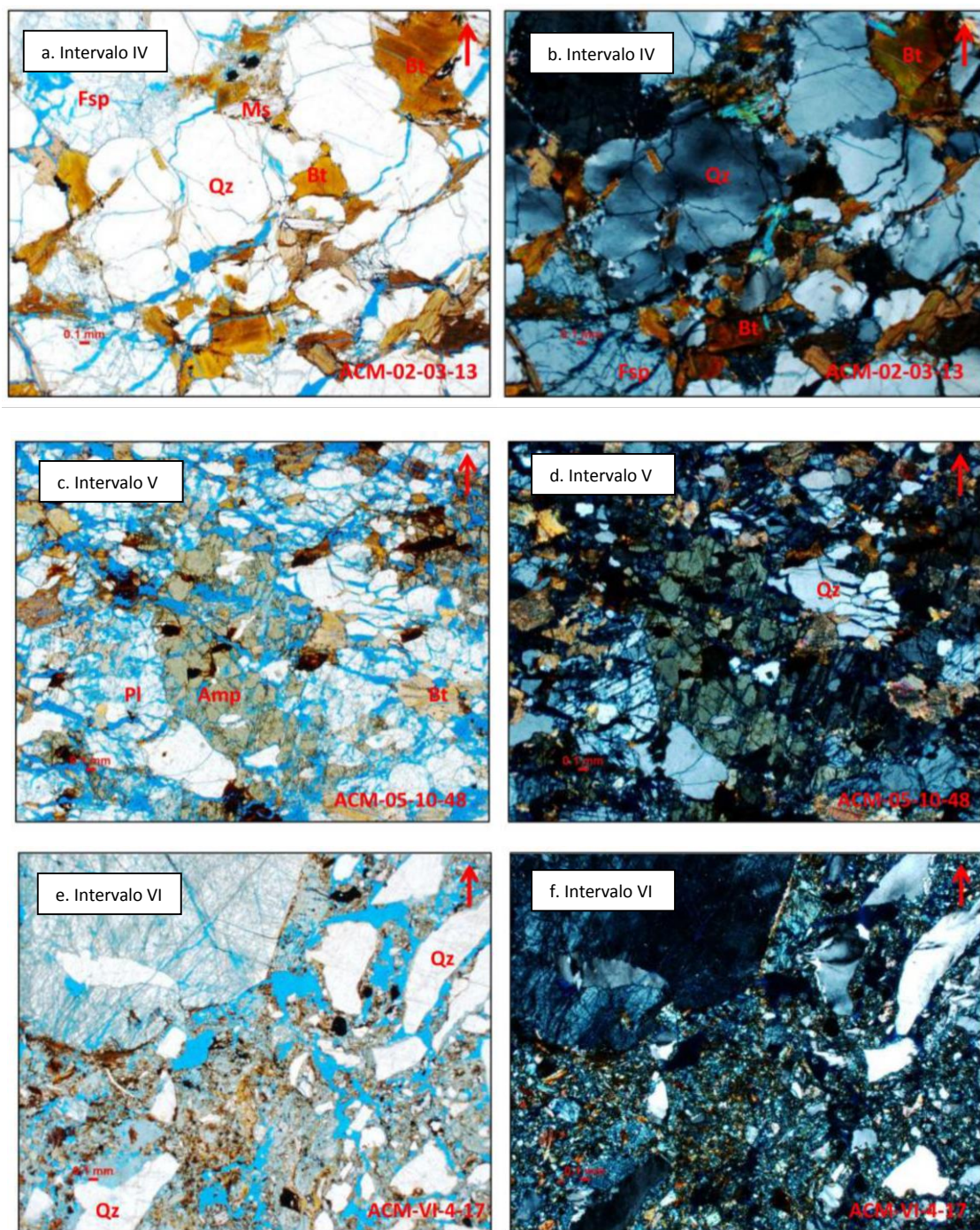


TABLA 10: Mineralógica identificada para cada uno de los intervalos de meteorización de roca Néisica con su respectivo porcentaje, junto con la porosidad observada en sección delgada.

Intervalo	Muestra	Estructura	Textura	Composición	%	Composición	%
VI	ACM-VI-1117	Roca fracturada	Fragmentos angulares de roca y minerales embebidos en una matriz fina.	Cuarzo Plagioclasa Feldespato K+ Piroxeno Sericita Matriz fina	20.1 2.8 2.8 1 5.3 34.5	Muscovita Biotita Óxidos (limonita) Óxidos (leucoxeno) Óxidos (hematita) Porosidad	1.6 2.2 1.6 2.8 5.8 19.5
V	ACM-05-10-48	Néisica, Roca fracturada	Lepidogranoblástica	Cuarzo Plagioclasa Hornblenda Piroxeno Biotita	19.2 22.3 10.6 2.2 22.3	Cementos arcillosos Cemento Hem-Lim Porosidad Clorita	5.6 5 11.7 1.1
IV	ACM-02-03-13	Cristales micáceos presentan orientación	Lepidogranoblástica	Cuarzo Feldespato K+ Albita Plagioclasa Biotita	31.2 7.4 1.7 14.9 25.3	Moscovita Piroxeno Cementos arcillosos Porosidad Min Opacos	2.3 1.7 4.6 8.6 2.3
III	ACM-04-07-20	Bandeada, Roca fracturada	Lepidogranoblástica	Cuarzo Feldespato K+ Albita Plagioclasa Sericita Biotita	29.9 14.1 1.7 26 0.6 19.2	Moscovita Epidota Cementos arcillosos Porosidad Min Opacos	0.6 0.6 1.1 5.6 0.6
II	ACM-II-26-01	Néisica, Roca fracturada	Lepidogranoblástica	Cuarzo Feldespato K+ Plagioclasa Granate Sericita Biotita Moscovita	63 9 7.9 2.2 1.1 6.1 2.2	Piroxeno Cemento Limonita Cemento Leucoxeno Cemento Hematita Porosidad Min Opacos	1.1 0.6 1.1 4.5 0.6 0.6
I	ACM-I-01-30	Néisica, Bandeada, Localmente augen	Lepidogranoblástica	Cuarzo Plagioclasa Feldespato K+ Piroxeno Sericita Silimanita	47.2 0.7 13 0.7 2.8 6.8	Biotita Moscovita Óxidos (limonita) Óxidos (leucoxeno) Porosidad	8.9 12.3 4.8 1.4 1.4

7.3.1.2 Perfil Granodiorítico. El estudio petrográfico de este tipo de roca confirma la litología de acuerdo con la clasificación QAPF de Streckeisen (1976) en la Figura 44 se observa los intervalos de meteorización I, II y III y en la figura 45 intervalos de meteorización IV, V y VI; en las secciones se identificó una estructura masiva localmente con orientación de minerales micáceos como biotita y un fuerte fracturamiento de carácter intra-cristalino y disolución de feldespatos (especialmente plagioclasas).

Texturalmente estas rocas son holocristalinas, fanerítica de grano fino a muy grueso e hipidiomórficas. Localmente tiene texturas pertítica y poikilítica. (Tabla 11). El cemento está constituido por minerales arcillosos y óxidos de hematita – limonita los cuales precipitaron a partir de fluidos probablemente meteóricos que percolaron por las fracturas. La Porosidad es de tipo secundaria, generada por la disolución de plagioclasas, el fracturamiento de la roca y la apertura de estas fracturas bajo condiciones frágiles. Los valores varían con 0% para el intervalo I y 27.2% para el intervalo VI, siendo este el de mayor porcentaje.

En cuanto a la composición mineralógica (Tabla 11) siendo el Cuarzo, Feldespato potásico, Plagioclasea, Biotita, Moscovita quienes hacen parte de los minerales principales, los Piroxenos y Minerales Opacos hacen parte de los minerales accesorios y la Epidota y Clorita como mineral de alteración. En cuanto a la descripción de los mismos el Cuarzo se presenta como cristales subhedrales y anhedrales, fracturados, incoloros, con relieve de bajo grado, colores de interferencia de primer orden, presentan extinción ondulante. El Feldespato potásico forma cristales fracturados, euhedrales y subhedrales, incoloros, con relieve de bajo grado y colores de interferencia de primer orden; se presentan sin macla y exhibiendo a nivel local una textura pertítica. La Plagioclasea aparece como cristales subhedrales, incoloros, con colores de interferencia grisáceos de primer orden, y macla polisintética de la albita, afectada por disolución, presentando alteración a sericita y Epidota. A partir de la muestra AC-09-27-118: Intervalo de meteorización

III, hasta AC-12-32-187: Intervalo de meteorización V. La Biotita se presenta como cristales subhedrales y anhedrales con colores que varían de marrón a rojizos, relieve medio-alto, colores de interferencia altos de segundo y tercer orden; en algunas secciones estos minerales presentan una pseudorientación. La Muscovita aparece en forma de cristales euhedrales incoloros, de relieve medio, colores de interferencia de segundo orden; y se presentan formando inclusiones al interior de Plagioclasa o localmente asociadas con la Biotita. Los Piroxenos se presentan en cristales incoloros anhedrales aislados, de relieve alto, con exfoliación en dos direcciones formando ángulos de 90°, colores de interferencia altos de segundo a tercer orden. Localmente está asociado con la epidota y óxidos. Presente solo en la Muestra AC-11-27-176: Intervalo de meteorización I. Los Minerales Opacos aparecen como individuos incoloros en nicoles cruzados y paralelos, aislados. La Clorita se presenta en cantidades trazas y de manera local como alteraciones de la Biotita. Finalmente la Epidota se presenta como cristales anhedrales de relieve alto, altos colores de interferencia, formando inclusiones al interior de los cristales de Plagioclasa, y al parecer como material de relleno de fracturas. Localmente está asociado con los Piroxenos.

Figura 44: Fotomicrografías orientadas (la flecha roja en la esquina superior derecha apunta hacia el norte) a 2,5x en nicols paralelos. Litología Granodiorítica (a) y (b) Intervalo I: Roca sin fracturamiento, (c) y (d) Intervalo II: aparición de microfracturas que atraviesan la roca, (e) y (f) Intervalo III: alteración de plagioclasas a Sericita indicando procesos de alteración hidrotermal o interacción fluido roca, y la subsecuente disolución de éstas generando una porosidad secundaria adicional.

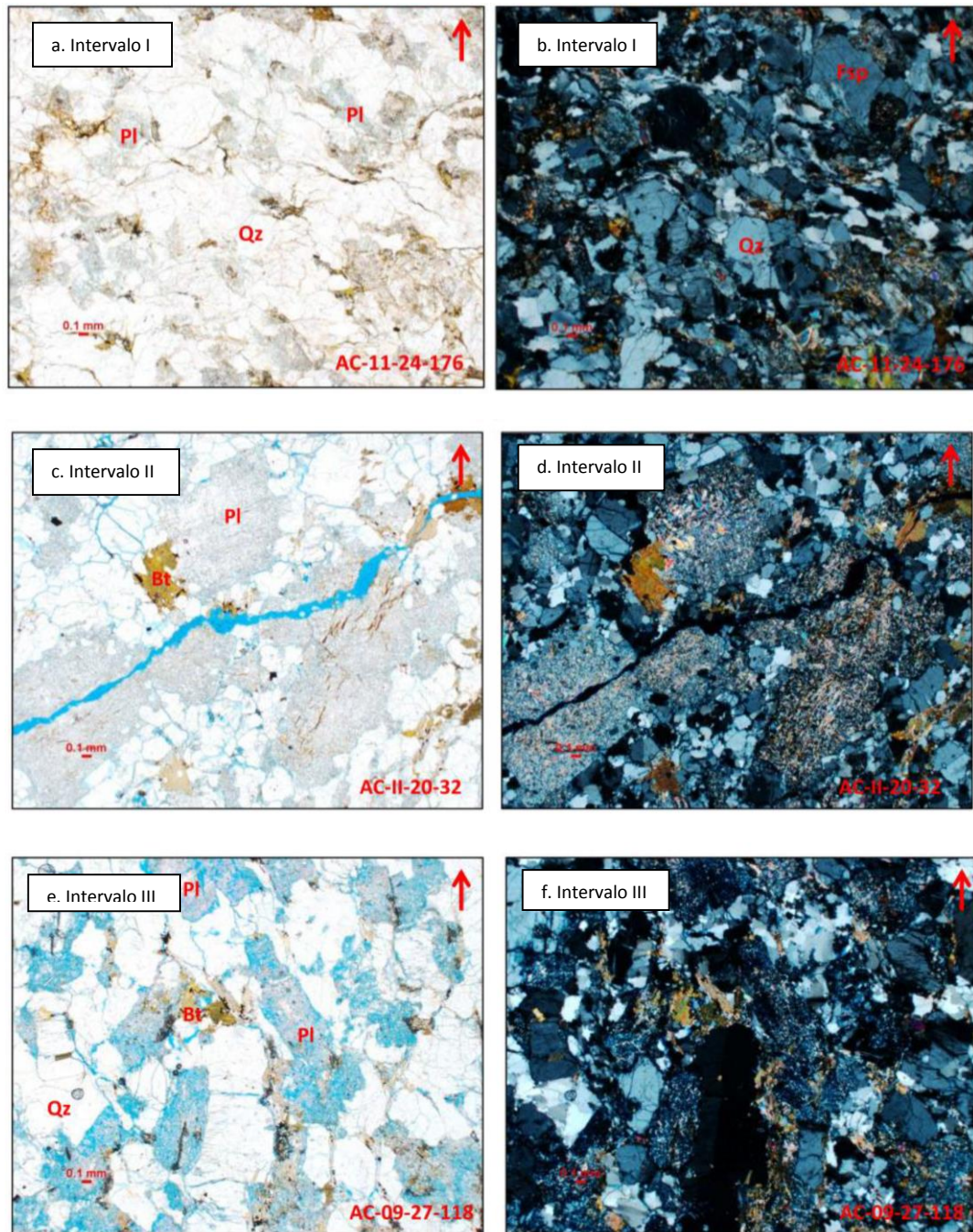


Figura 45: Fotomicrografías orientadas (la flecha roja en la esquina superior derecha apunta hacia el norte) a 2,5x en nicoles paralelos de las rocas ígneas presentes en el área de estudio. (a) y (b), (c) y (d), (e) y (f) se observa una estructura masiva y fracturamiento, además de disolución de plagioclasas (a) y (b).

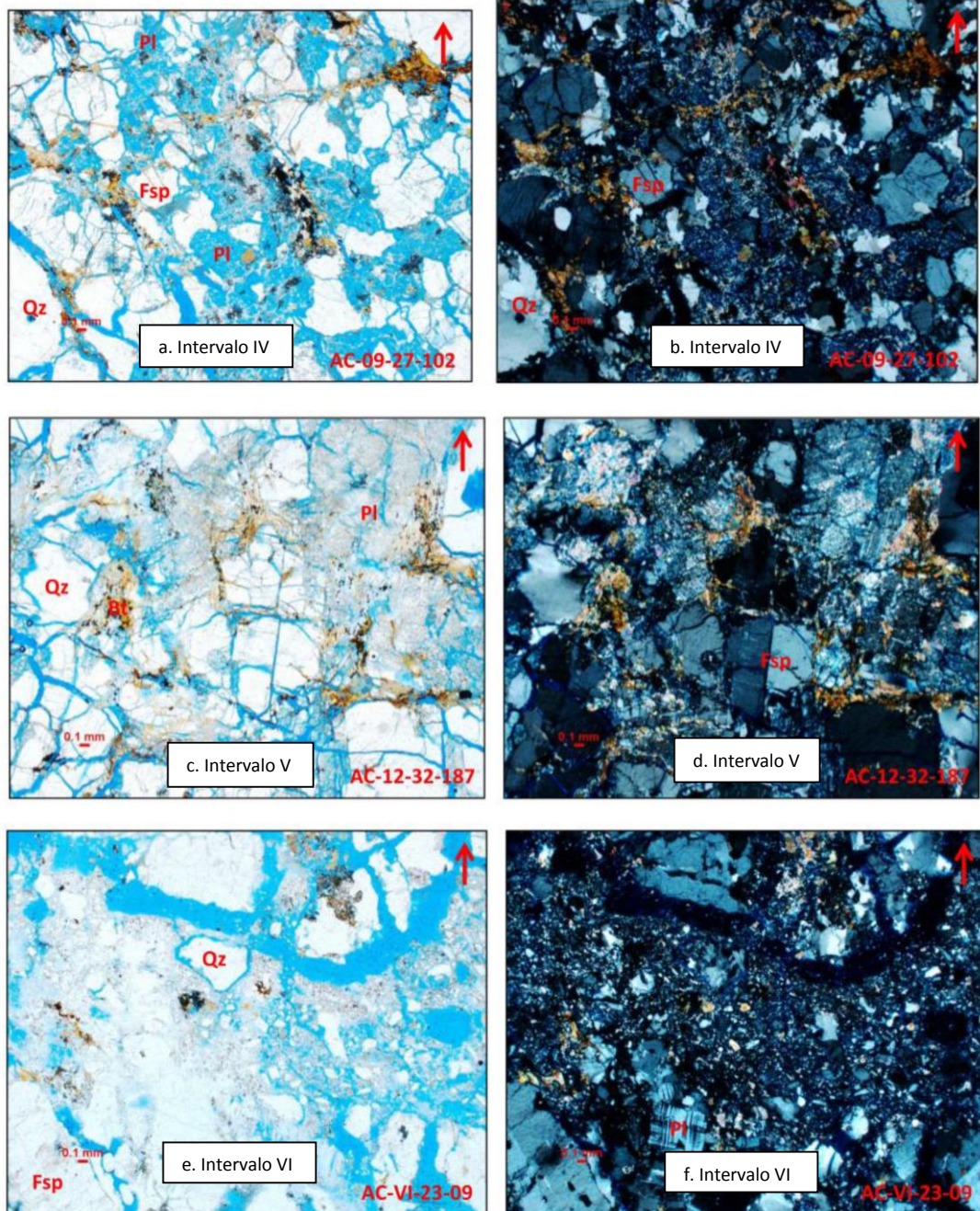


TABLA 11: Mineralogía identificada para cada uno de los intervalos de meteorización de roca Granodiorítica con su respectivo porcentaje, junto con la porosidad observada en sección delgada.

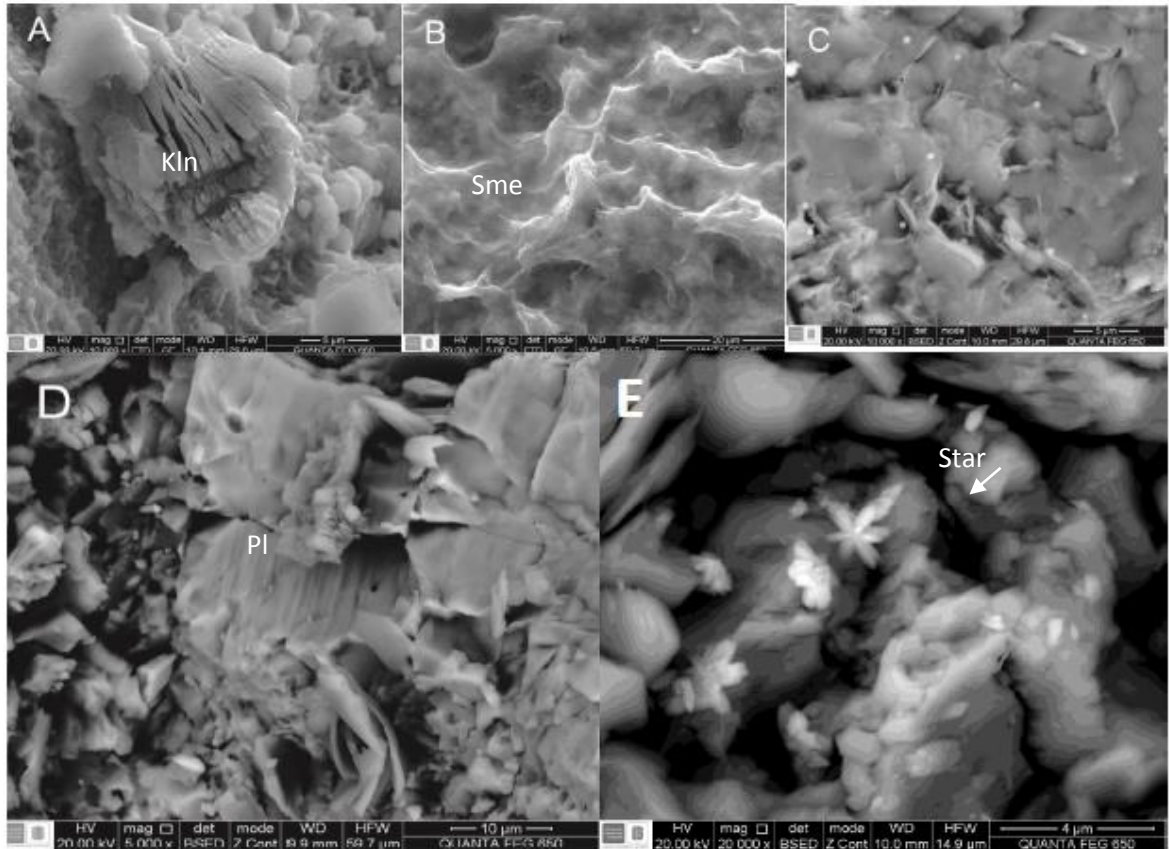
Intervalo	Muestra	Estructura	Textura	Composición	%	Composición	%
VI	AC-VI-23-09	Se ha perdido la estructura original	Fragmentos angulares de roca y minerales embebidos en una matriz fina	Cuarzo Plagioclasa Feldespatos K+ Epidota Matriz fina	26.1 8.4 5.8 4 11.7	Moscovita Biotita Óxidos (hematita) Porosidad	6.5 9 1.3 27.2
V	AC-12-32-187	Masiva	Holocristalina	Cuarzo Feldespatos K+ Microclina Plagioclasa Sericitita Biotita	28.3 10.8 0.8 26.6 7.5 3.3	Moscovita Epidota Cementos arcillosos Cemento Hem-Lim Porosidad Min Opacos	1.6 2.5 7 0.8 10 0.8
IV	AC-09-27-112	Masiva	Holocristalina, Fanerítica de grano fino-medio e Hipidiomórfica	Cuarzo Feldespatos K+ Plagioclasa Sericitita Biotita Muscovita Epidota	25.4 12.6 8.2 12 4.4 1 9.3	Cementos arcillosos Cemento Hem-Lim Porosidad Min Opacos Circón Clorita	8.7 3.8 13.1 0.5 0.5 0.5
III	AC-09-27-118	Pseudorientación de cristales de biotita-muscovita, fracturamiento de la roca y masiva	Holocristalina, Fanerítica de grano fino-grueso e Hipidiomórfica	Cuarzo Feldespatos K+ Plagioclasa Sericitita Biotita	29.4 14.1 14.1 7.3 11.9	Moscovita Epidota Leucóxeno Cementos arcillosos Porosidad	2.3 5.1 0.6 7.3 7.9
II	AC-II20-32	Masiva	Holocristalina, Fanerítica de grano fino-medio.	Cuarzo Feldespatos K+ Plagioclasa Sericitita Biotita	33 15 18.5 12.8 7.3	Apatito Cementos arcillosos Cemento Hem-Lim Porosidad Min Opacos	0.6 3.4 1.1 6.1 2.2
I	AC-11-24-176	Los cristales de cuarzo, feldespato y biotita-muscovita se presentan orientados.	Holocristalina, Fanerítica de grano fino-grueso, Hipidiomórfica, Peritítica	Cuarzo Feld K+ Plagioclasa Sericitita Biotita Muscovita	34 18.6 26.6 4.5 5 2.8	Epidota Piroxeno Cementos arcillosos Porosidad Min Opacos	4.5 1.7 1.7 0 0.6

7.3.2 Análisis petrográfico mediante Imágenes de microscopia electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX). La transición de los intervalos de meteorización para roca Néisica y roca Granodiorítica se determinó mediante la técnica de microscopia electrónica de Barrido (SEM) y Difracción de Rayos X (DRX), con el análisis SEM se logró identificar principalmente minerales arcilla de acuerdo a su morfología, mientras que con DRX se determinaron cadenas químicas completas, permitiendo realizar la caracterización mineralógica de cada uno de los intervalos de meteorización.

7.3.2.1 Perfil de roca Néisica. Dentro del perfil de roca Néisica se encontró un mineral de morfología en estrella, que solo se presenta en el intervalo I de meteorización, se caracteriza por presentar numerosos individuos que irradian de un punto central, formando numerosos agregados que se han formado sobre la superficie de algunas arcillas. Este tipo de morfología ha sido observada en algunos trabajos en los cuales se ha llevado a cabo la síntesis de nuevos materiales. Sin embargo, este mineral (Aluminosilicato con Fe y K) podríamos asociarlo a la interacción roca – fluido, la cual favoreció su precipitación.

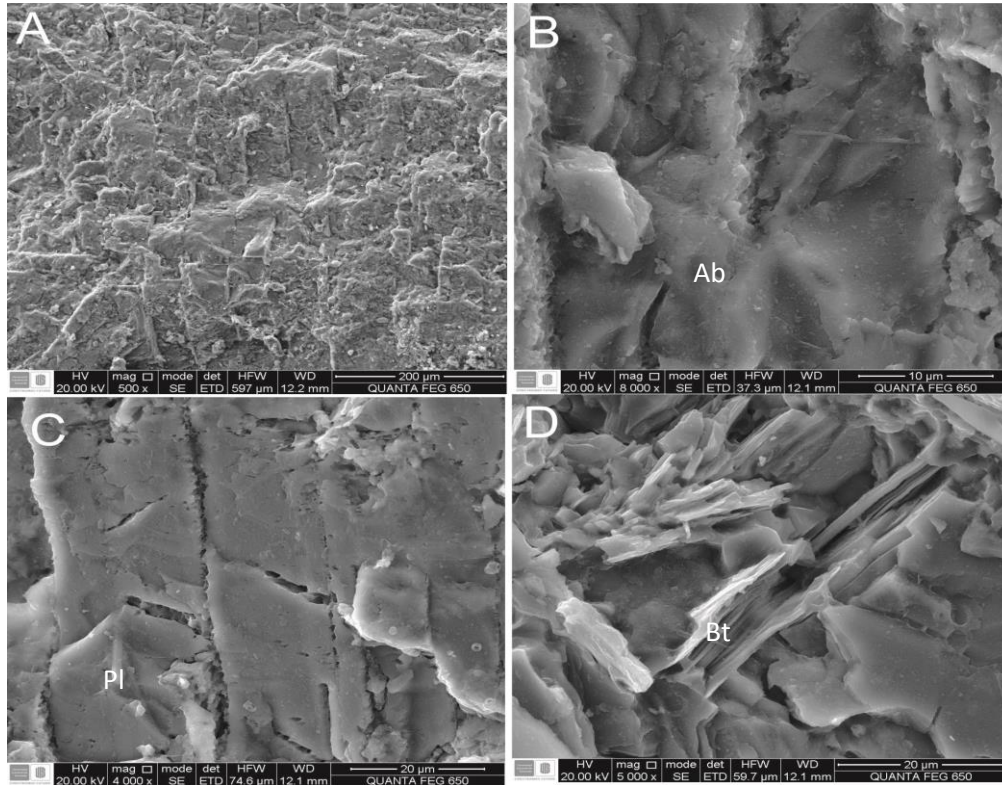
Intervalo I: Granos de Cuarzo, Albita, Microclina, Moscovita, Caolinita, Esmectita, Estrella, Vermiculita y Microfábrica en “panal de abejas” las cuales son estructuras abiertas formadas por flóculos de partículas de arcilla unidas entre sí por fuerzas de adherencia. Presenta gran cantidad de poros intercomunicados y es característica de medios salinos y suelos susceptibles (González et al., 2002).

Figura 46: Imágenes SEM del perfil de meteorización. (A) Caolinita (Kln) exfoliada. (B) Esméctica (Sme). (C). Microfábrica en “panal de abejas” (D) Alteración química de granos de Plagioclasa (Albita la cual se identificó mediante análisis de Difracción de rayos X DRX) (E) Mineral de morfología en estrella (Star).



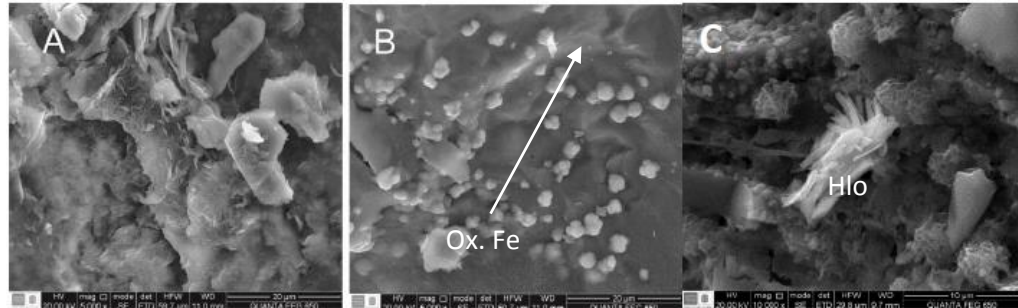
Intervalo II: Se observan granos de Albita y Biotita. La presencia de arcilla en este intervalo no es abundante, se detectan algunas fracturas que cortan los minerales.

Figura 47: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, intervalo II. (A) Fracturas paralelas, en una escala de 200 micras. (B) Disolución de plagioclasas, posiblemente Albite por la cantidad de Na además de la presencia de micro-vetillas (C). Alteración química de granos de Plagioclasa. (D) Exfoliación de la Biotita.



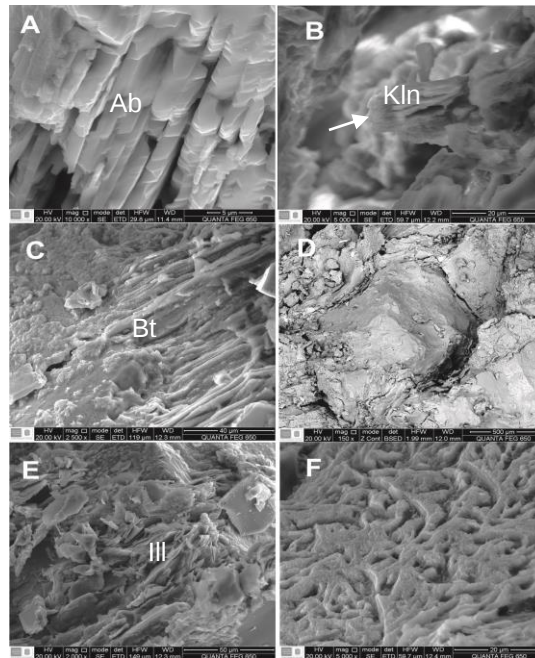
Intervalo III: Se identificaron granos de Feldespato potásico y Biotita además de un incremento de la Microfábrica en “panal de abejas”, que recubre gran parte de los minerales presentes en la roca.

Figura 48: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, Intervalo III. (A) Microfábrica en “panal de abejas” (B) Granos de Plagioclasa (Pl) recubiertos por Óxidos de Fe (Ox. Fe) (C) cúmulos de haloisita (Hlo) que crecen en un grano de feldespato.



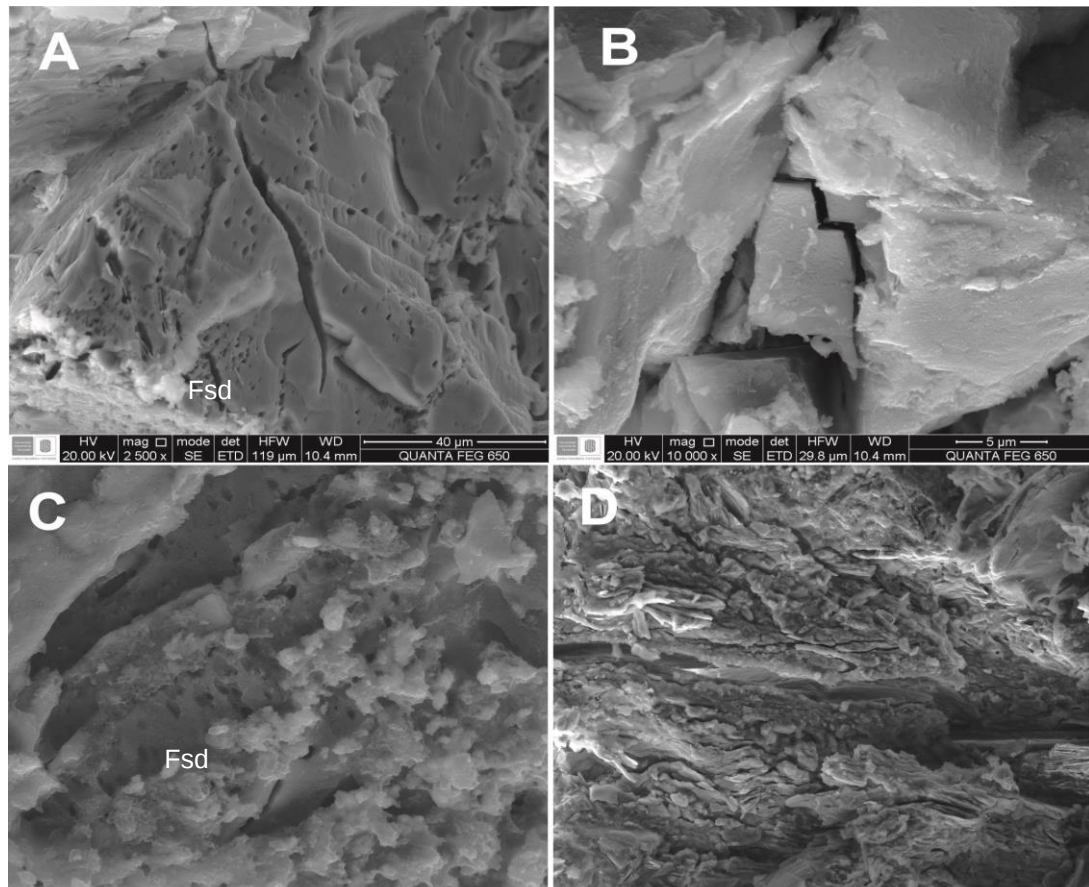
Intervalo IV: Granos de Albita, Caolinita Exfoliada, Biotita, Neo-formación de minerales arcilla e Illita.

Figura 49: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, Intervalo IV. (A) Microfracturas presentes en granos de Plagioclasa (Albita- Ab) (B) Caolinita (Kln) Exfoliada. (C) Exfoliación de la biotita (Bt) parcialmente reemplazada por algunos óxidos de Hierro (Fe) (D) Estructura. (E) Illita (Ill). (F) Argilificación (neo-formación de minerales arcilla).



Intervalo V: Granos de Feldespato K y Microfábrica en “panal de abejas”.

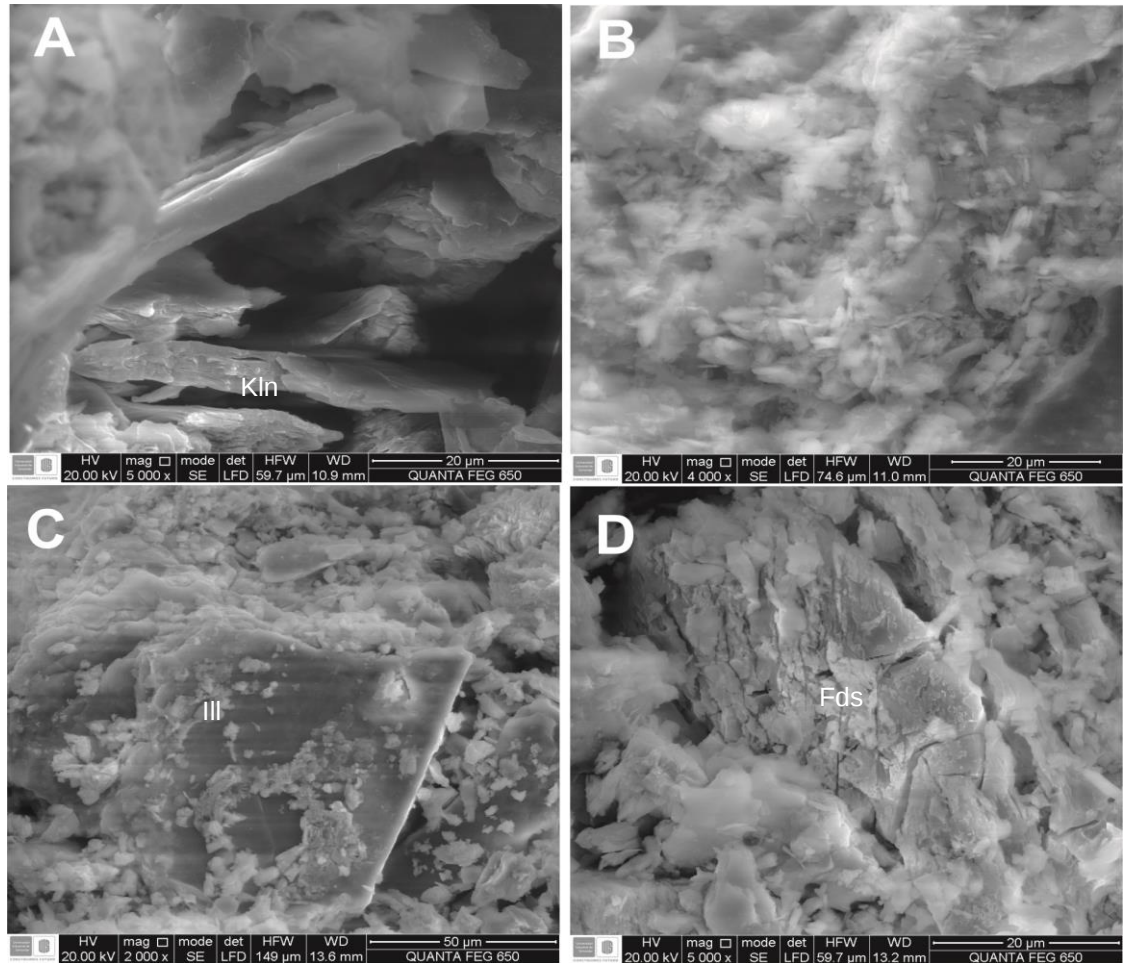
Figura 50: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, intervalo V. (A) Alteración química caracterizada por granos de feldespato (Fsd). (B) Microfracturas. (C) alteración química de granos de feldespato (Fsd) recubierto por una Microfábrica. (D) Microfábrica en “panal de abejas”.



Intervalo VI: Se observa un incremento en la aparición de caolinita con relación a las otras muestras y Argilificación de la Plagioclasa, además material suelto el cual

se dispersa que con el haz de electrones. A lo estados finales de disolución, se le realizo un pulso, dando como resultado un alto contenido de Al y K.

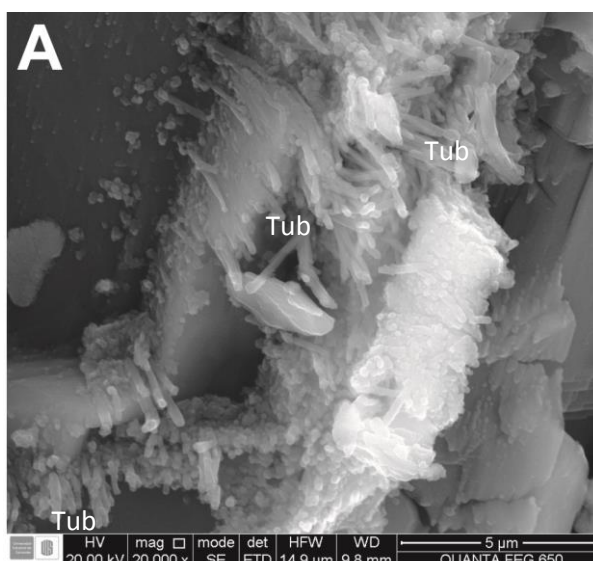
Figura 51: Imágenes SEM del perfil de meteorización de roca Néisica, intervalo VI. (A) Caolinita (Kln) Exfoliada o En forma de libro. (B). Argilificación (minerales arcilla neo-formados) (C) Illita (Ill), la cual se incluye en el grupo de las micas, el reporte de microanálisis presenta picos de Al, Fe, Mg y Ti (D) Microfracturas en granos de Feldespato (Fds).



7.3.2.2 Perfil de roca Granodiorítica. En este perfil de meteorización mediante las imágenes de Microscopia electrónica de Barrido, se identificó un mineral de morfología Tubular el cual está presente desde el intervalo I, hasta el intervalo V, éste se dispone en agregados paralelos de números individuos que crecen sobre la superficie de algunas arcillas o desarrollan rellenos en microfracturas. En algunos casos estos agregados tienden a formar numerosos centros piramidales sobre una superficie. Una morfología similar ha sido reportada en minerales del grupo de la serpentina (Crisotilo). (González, J et al., artículo en proceso de publicación)⁵ No obstante, el espectro EDS correspondiente a dicho mineral refleja la ocurrencia de un aluminosilicato con Fe y no a un mineral del grupo de la serpentina como quiera que no presenta Mg.

Intervalo I: Granos de Cuarzo, Albite, Microclina, Moscovita y Mineral de morfología Tubular. **Figura 52.A**

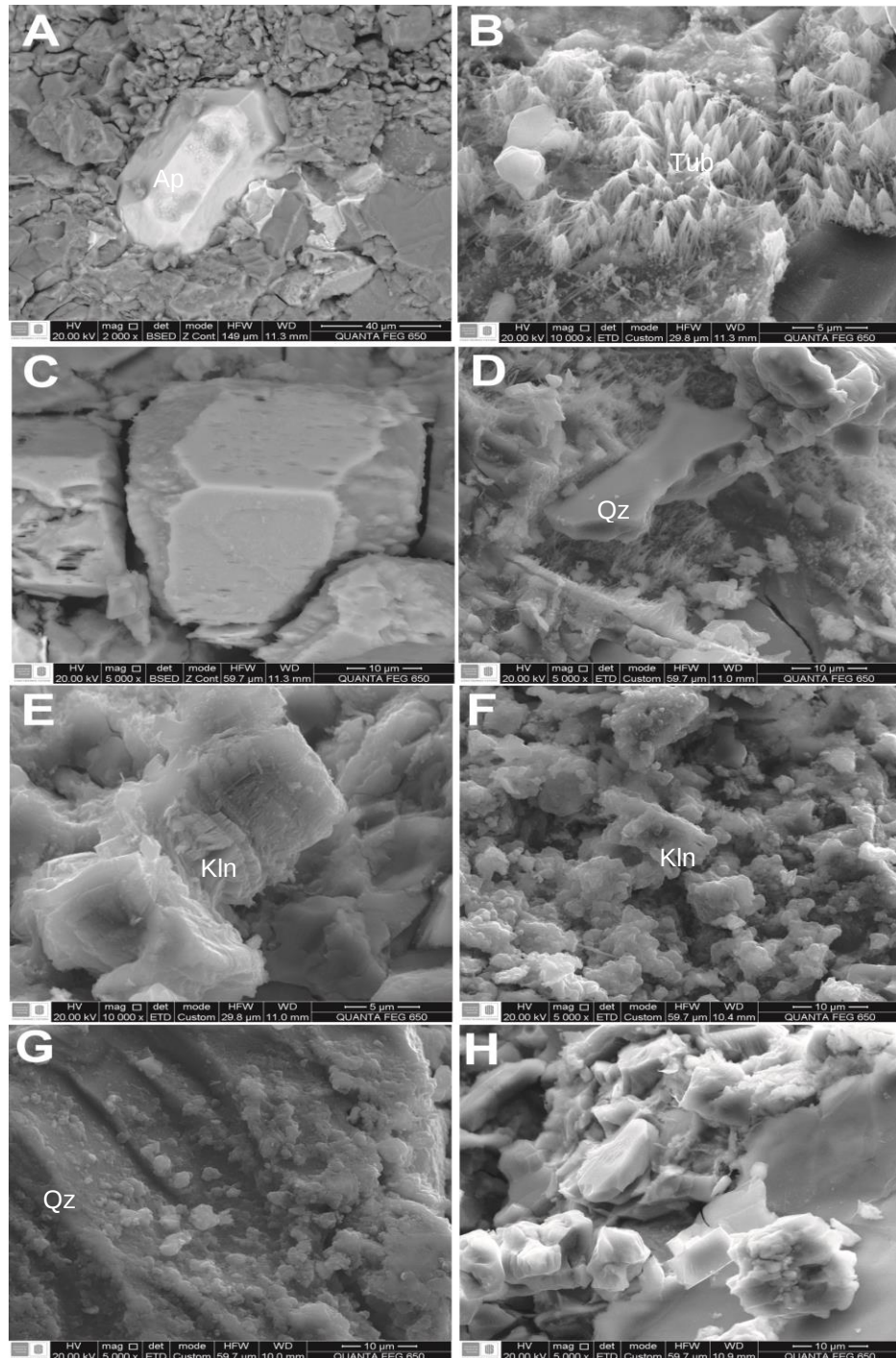
Figura 52: Imágenes SEM del Mineral de morfología Tubular (Tub), que crece de manera orientada y ordenada.



Intervalo II: Granos de Cuarzo, Albite, Microclina, Moscovita, Clinocloro, Caolinita, Zircón y Textura Tubular.

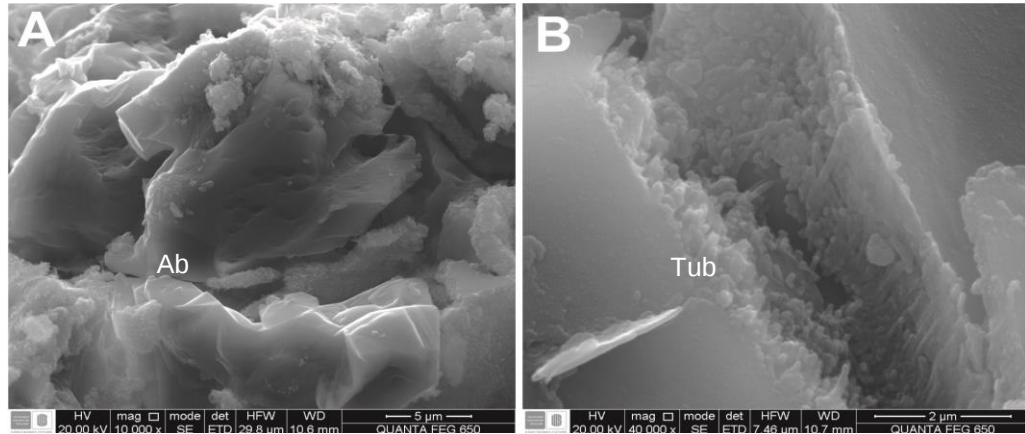
⁵ Información obtenida gracias al Santander, mediante comunicación verbal.

Figura 53: Imágenes SEM (A) Zircón (Zr) (B) Textura tubular (Tub) (C) Alteración química de cristales de Apatito (Ap) (D) Cuarzo (Qz) sin alteración química y sin minerales de alteración alrededor. (E) Caolinita (Kln) exfoliada (F) Caolinita exfoliada (G) Cuarzo recubierto con óxidos de Fe y Mg. (H) Disolución mineral.



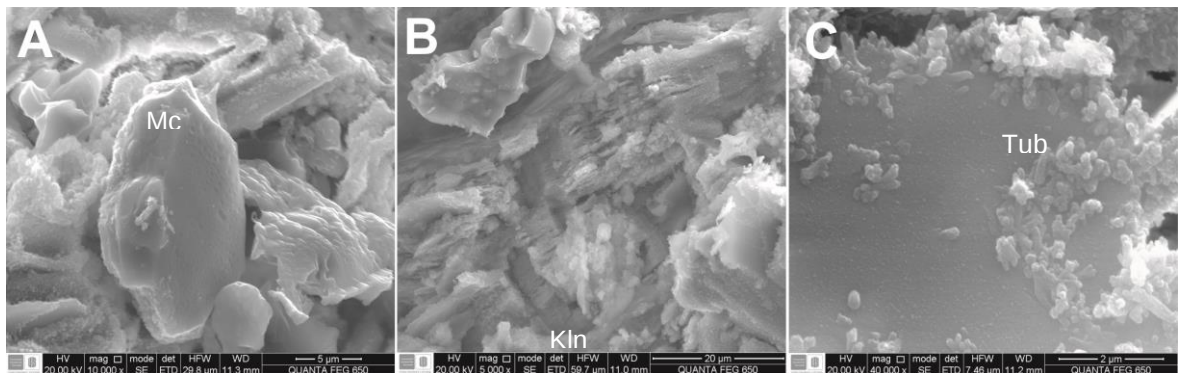
Intervalo III: Granos de Cuarzo, Albita, Microclina, Moscovita y Mineral Tubular

Figura 54: Imágenes SEM (A) Alteración química en granos de Plagioclasa (Albita- Ab, mineral identificado mediante análisis de Difracción de Rayos X, DRX.) (B) Mineral Tubular (Tub) que crece en las caras o superficies de otros minerales.



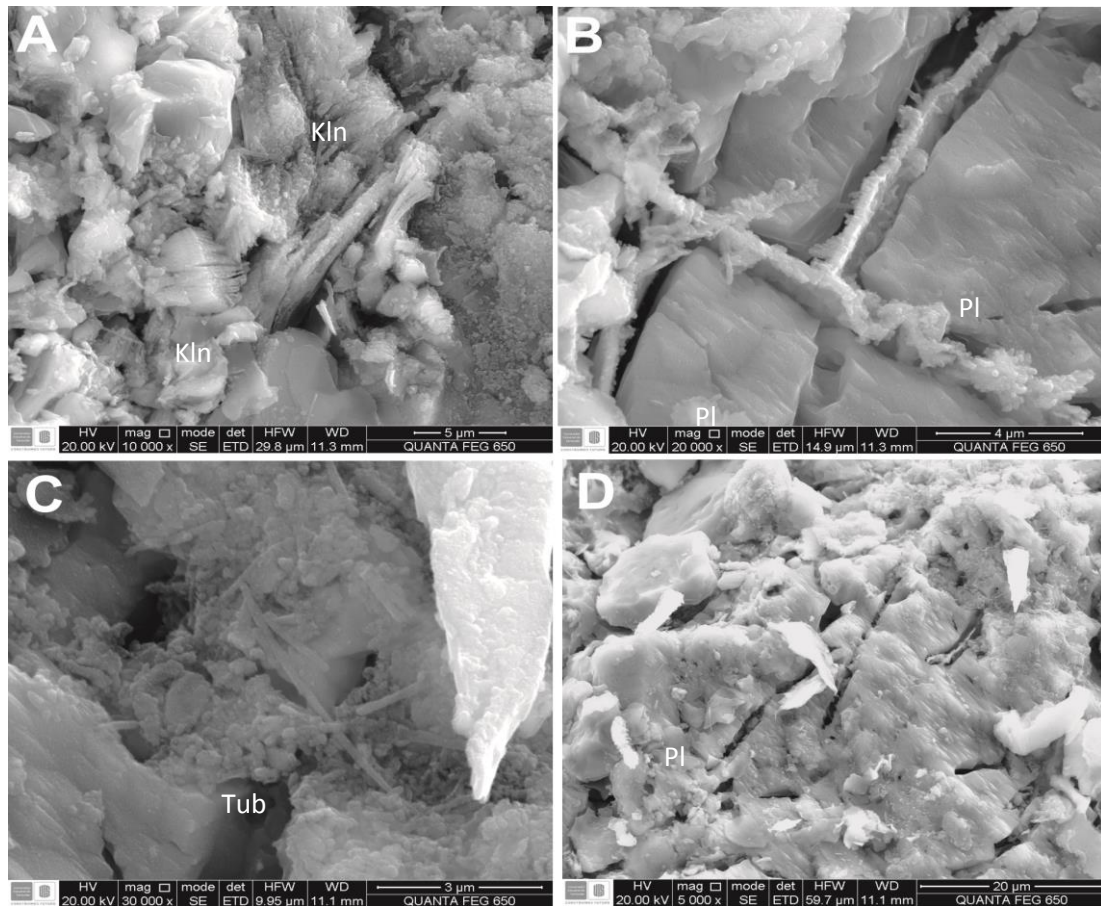
Intervalo IV: Granos de Cuarzo, Albita, Microclina, Moscovita, Epidota, Lizardita (Grupo de la Serpentinita), Caolinita y Mineral Tubular.

Figura 55: (A) Alteración química de granos de Feldespato, (Microclina- Mc, mineral identificado mediante análisis de Difracción de Rayos X, DRX) con el EDS se observan concentraciones de elementos de tierras raras. (B) Caolinita Exfoliada (C) Mineral de morfología Tubular, presenta altos picos en Al, K, Mg, Na, Fe y Ti.



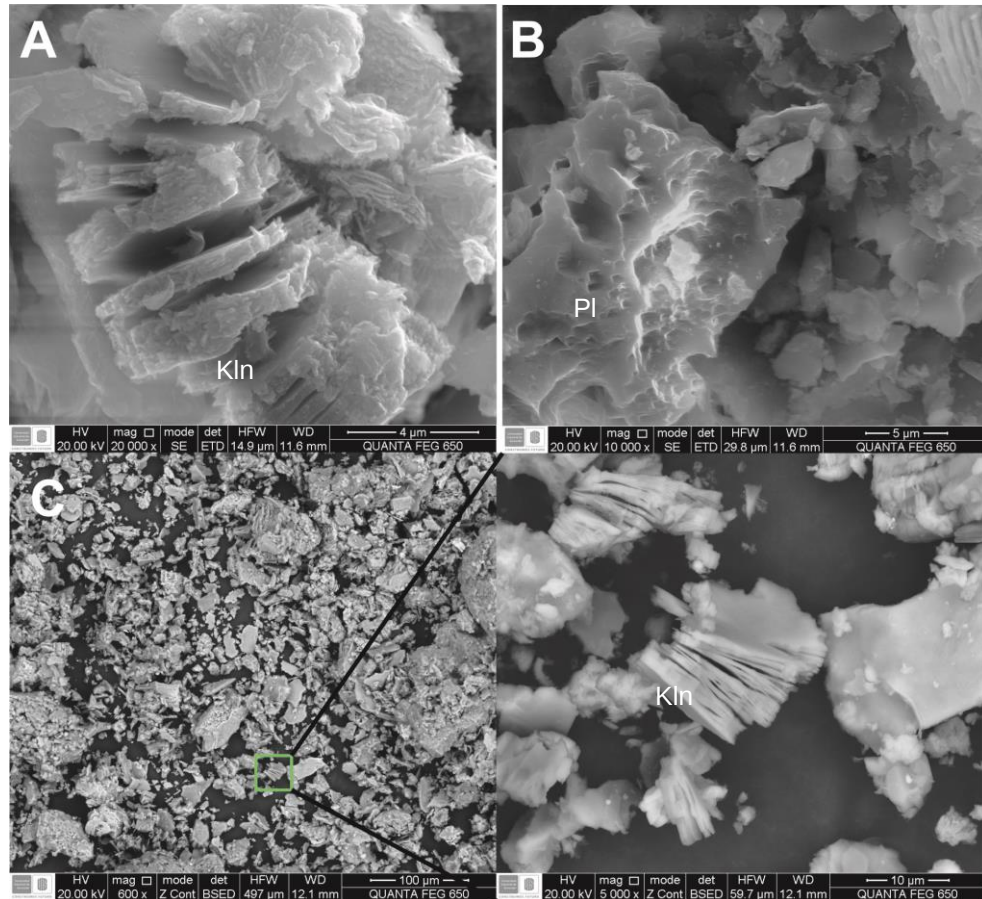
Intervalo V: Granos de Cuarzo, Albita, Microclina, Moscovita, Caolinita y Acicular.

Figura 56: Imágenes SEM del intervalo de meteorización (A) Caolinita (Kln) exfoliada (B) Alteración química en granos de Plagioclasa (Pl). (C) Mineral de morfología Tubular (Tub). (D) Alteración química en granos de Plagioclasa.



Intervalo VI: En este intervalo se observa el incremento de alteración química en granos de Plagioclasa y Caolinita exfoliada rodeada de una micro fábrica de panal de abejas, además de una matriz compuesta de Caolinita. Figura 57.

Figura 57: Imágenes SEM del intervalo de meteorización (A) Caolinita (Kln) exfoliada (B) Alteración química en granos de Plagioclasa (Pl). (C) Matriz-Caolinita.



7.4 ANÁLISIS QUÍMICO: FLUORESCENCIA DE RAYOS X

En la interpretación de los datos obtenidos por fluorescencia de rayos x enviados por el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander (Tabla 12), se utilizaron las metodologías empleadas en los trabajos de Domínguez et al 2011, Duzgoren et al 2006, Aristizábal et al 2009 y Price et al 2002, extrayendo los índices de meteorización y de alteración apropiados para la identificación de parámetros de meteorización de cada uno de los intervalos encontrados en Campo.

La principal suposición en la formulación de productos en los índices de alteración química consiste en que el comportamiento de los elementos químicos es

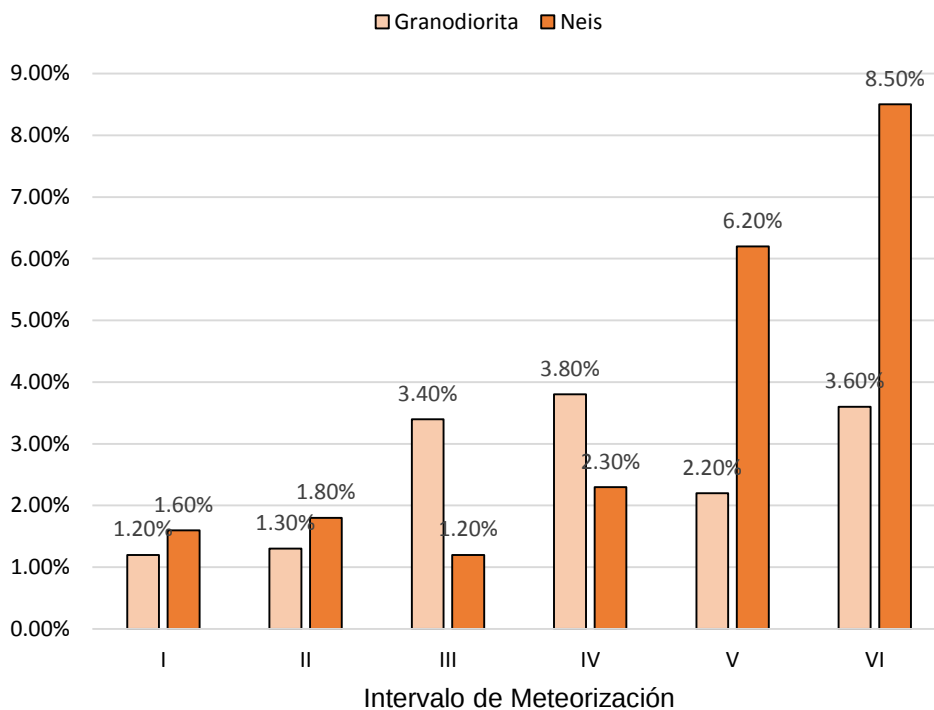
controlado únicamente por el grado de meteorización. Más específicamente, se espera que, con la intensidad de la meteorización a) los óxidos mayores, incluyendo Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 y MgO , considerados inmóviles, se incrementen, b) SiO_2 , Na_2O , K_2O y CaO , considerados móviles, se empobrezcan, y c) L.O.I (*Loss On Ignition* = Pérdidas por ignición) se incremente. (Aristizabal et al., 2009 y Domínguez et al., 2011).

TABLA 12: Porcentajes correspondientes a los óxidos mayores para el perfil de roca Granodiorítica (parte superior) y perfil de roca Néisica (parte inferior).

ÓXIDOS MAYORES EN EL PERFIL GRANODIORÍTICO													
INTERVALO	MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	L.O.I	R	CIA
I	AC-11-24-178 P. DERECHA	69.69	15.67	7.01	1.57	1.01	3.20	0.18	0.04	0.22	1.20	4.45	58.27
II	AC-II-20-37	67.52	16.70	5.43	2.29	0.40	4.98	0.44	0.13	0.47	1.30	4.04	60.71
III	AC-09-27-122 ZONA 2	66.41	17.85	5.34	3.10	1.10	1.35	0.66	0.02	0.46	3.40	3.72	69.62
IV	AC-09-27-114 ZONA 1	65.50	18.33	5.71	3.36	1.24	0.73	0.46	0.03	0.47	3.80	3.57	70.47
V	AC-12-32-189 NARANJA	68.64	16.88	6.50	2.10	0.72	1.97	0.38	0.02	0.29	2.20	4.07	64.75
VI	AC-11-23-172	66.63	18.86	6.35	2.19	0.81	0.66	0.34	0.01	0.28	3.60	3.53	70.69
ÓXIDOS MAYORES EN EL PERFIL NÉISICO													
INTERVALO	MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	L.O.I	R	CIA
I	ACM-01-01-03	77.59	10.87	3.52	2.69	0.64	1.83	0.55	0.04	0.39	1.60	7.14	64
II	ACM-09-26-110	73.78	11.48	2.23	4.37	2.20	2.15	0.95	0.15	0.52	1.80	6.43	64
III	ACM-04-07-33	66.85	15.74	4.50	3.70	2.41	3.51	1.23	0.06	0.52	1.20	4.25	60
IV	ACM-12-03-200	63.55	14.29	3.20	14.29	1.94	2.14	2.22	0.04	1.41	2.30	4.45	66
V	ACM-05-10-51	53.83	17.01	1.08	2.10	4.57	2.11	2.36	0.15	1.08	6.20	3.16	69
VI	ACM-05-11-57	56.99	23.48	2.67	6.43	87ppm	0.04	0.89	0.02	0.74	8.50	2.43	90

7.4.1 Pérdida por Ignición (Loss On Ignition). La Pérdida por Ignición encontrada en las muestras de los 2 perfiles de meteorización concuerdan con lo descrito por (Aristizábal et al, 2009) el cual determinó que L.O.I va aumentando progresivamente con la intensidad de meteorización. Para el Perfil néisico se observa claramente (Figura 58) los valores de la roca fresca equivalente al Intervalo de Meteorización I están entre el 1% y el 2% y va aumentando hasta en el Intervalo VI equivalente al Suelo Residual, encontrándose entre valores de 8% y 9%. Para el perfil de Roca Granodiorítica, los valores tienden a aumentar mayoritariamente en los intervalos de meteorización III, IV y VI, equivalentes a la Roca Moderadamente, Altamente Meteorizada y el Suelo Residual respectivamente, pero sin embargo el dato del intervalo VI está por encima del promedio de los datos.

Figura 58: Pérdidas por Ignición (L.O.I)



7.4.2 Contenido de Óxidos Mayores. Es importante relacionar el comportamiento de los elementos químicos durante los intervalos de meteorización, ya que algunos de los elementos tienden a incrementarse (MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y TiO_2) a medida que aumenta la meteorización y otros (SiO_2 , Na_2O , K_2O y CaO) se reduzcan o empobrezcan. Para las muestras pertenecientes al perfil de roca Granodiorítica (Fig. 59) el orden de abundancia es $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O}$, conservándose esta relación durante todo el perfil de meteorización, mientras el contenido de Fe_2O_3 , CaO y Na_2O varían respecto a los intervalos de meteorización, por último el contenido de MgO y TiO_2 es muy bajo durante todo el perfil.

Figura 59: % Contenido de Óxidos Mayores, Perfil Granodiorítico

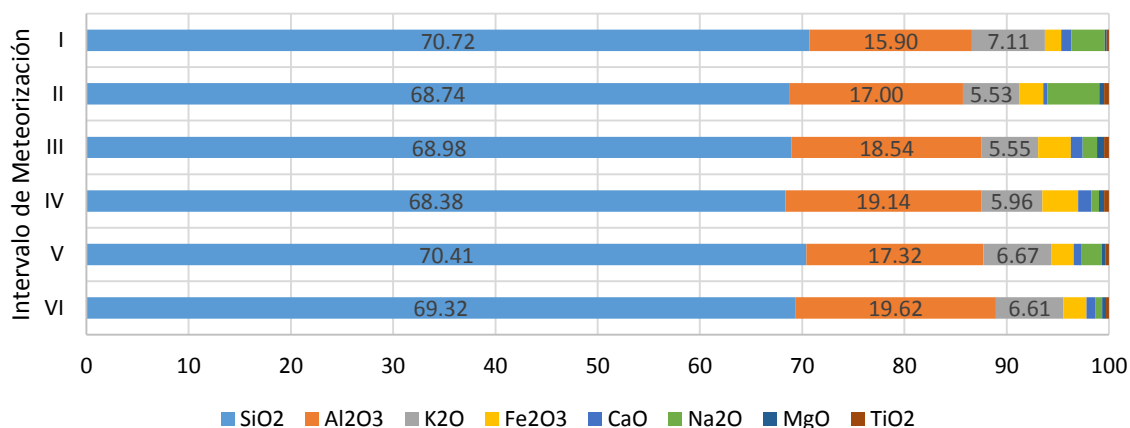
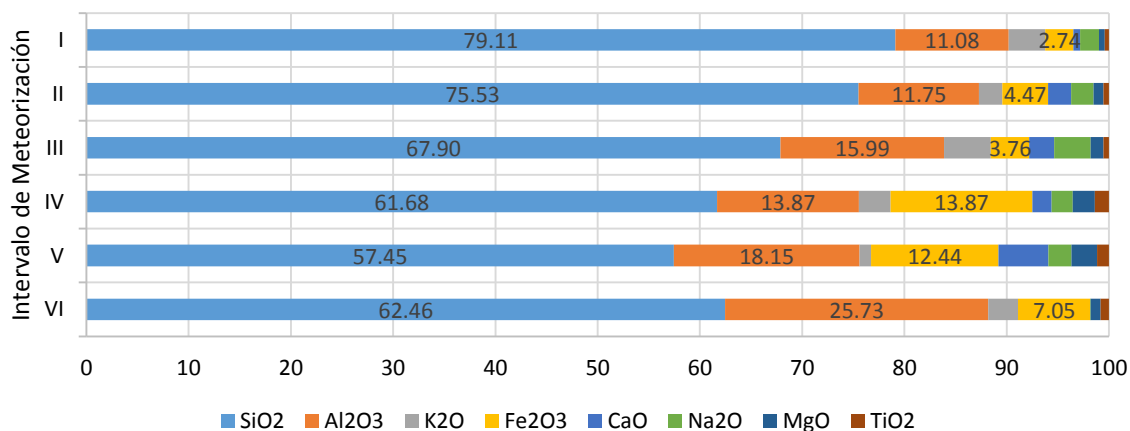


Figura 60: % Contenido de Óxidos Mayores, Perfil Néisico.



El contenido de Óxidos Mayores del perfil de roca Néisica (Fig. 60) se comporta de manera diferente, ya que el contenido de SiO_2 varía durante el perfil, inicia en el intervalo I correspondiente a Roca Fresca con valores cercanos al 80%, descendiendo en el intervalo V correspondiente a Roca Completamente Meteorizada a concentraciones menores al 60%, pero luego en el Intervalo VI que corresponde al Suelo Residual aumenta su concentración a valores por encima del 60%; el contenido de Al_2O_3 presenta valores de 11% en el intervalo I que corresponde a la Roca Fresca y el Intervalo VI que correspondiente al Suelo Residual presenta el valor más alto con un dato aproximado de 25% aumentando a medida que crece el grado de meteorización, mientras que el contenido de K_2O va disminuyendo a medida que avanza el perfil de Meteorización pasando de 3.59% en el intervalo I a 4.57% en el intervalo III y disminuyendo a 2.93% en el intervalo VI correspondiente al Suelo Residual. La concentración de CaO aumenta durante el perfil teniendo una pequeña disminución en el intervalo V, pero ya en el intervalo VI hay pérdida total, encontrándose 0% de su concentración, mientras que el Na_2O disminuye durante todo el perfil de meteorización y en el intervalo IV ya se ha perdido todo el contenido de Na_2O .

7.4.2.1 Análisis de los diagramas de variación. La principal ayuda de un diagrama de dos variables es que estos muestran la variación entre los elementos e identifican la tendencia que se desarrolla entre ellos. Para los datos del presente estudio, los diagramas de variación relacionan el % en peso (W) de Al_2O_3 con el % en W del resto de los Óxidos mayores, ya que el Al_2O_3 en el perfil de roca Granodiorítica se comporta de Manera constante con algunas variaciones menores y en el perfil de roca Néisica el Al_2O_3 aumenta a medida que aumenta el grado de meteorización.

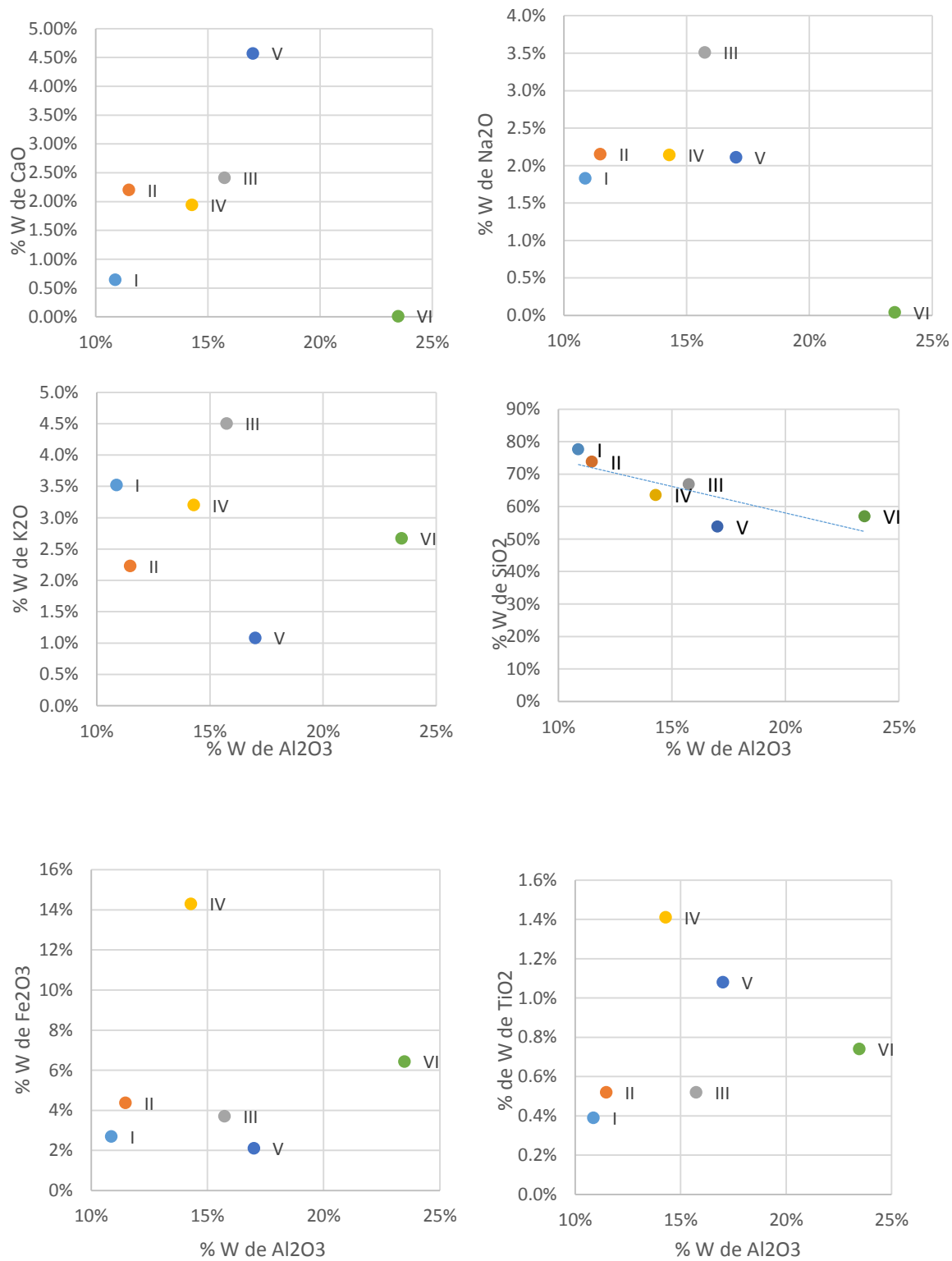
7.4.2.1.1 Diagramas de Variación en el Perfil de Roca Granodiorítica. Para éste perfil los diagramas de variación (Fig. 61) muestran que la concentración de Fe_2O_3 y TiO_2 tiene una relación positiva con respectó al Al_2O_3 ; estos al igual que la alúmina incrementan su concentración a medida que aumenta el grado de meteorización, teniendo una pequeña disminución en el intervalo V.

Figura 61: Diagramas de Variación para el perfil de Roca Granodiorítica.



7.4.2.1.2 Diagramas de Variación en el Perfil de Roca Néisica. Los diagramas de variación que desarrollan las concentraciones de Óxidos mayores en el caso del perfil de roca Néisica (Fig. 62) presentan mayor dispersión de los datos, por ejemplo el diagrama de porcentaje en W de CaO y Na₂O, los cuales presentan una relación positiva con la alúmina hasta el intervalo V que equivale a la roca completamente Meteorizada, y posteriormente en el intervalo VI que corresponde al Suelo Residual las concentraciones de CaO y Na₂O caen abruptamente hasta menos del 1% W. Para el SiO₂ el diagrama de variación presenta una relación negativa con el Al₂O₃, mostrando que disminuye su contenido a medida que aumenta el perfil de meteorización. Para el Fe₂O₃ y para el TiO₂ los diagramas de variación tiene una relación positiva con el Al₂O₃ mostrando que su contenido aumenta con el avance de la meteorización, sin embargo para el intervalo VI ambos elementos presentan picos de 14% y 1.4% respectivamente.

Figura 62: Diagramas de Variación para el perfil de Roca Néisica.



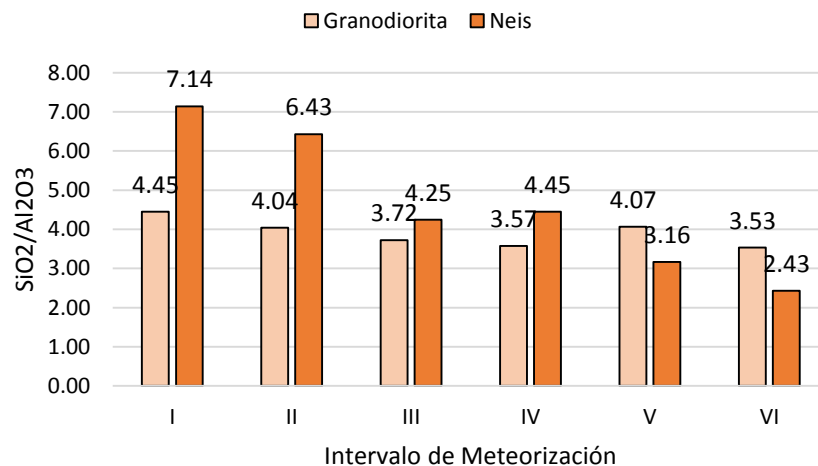
7.4.3 Análisis de Índices de Meteorización y Alteración. Con los datos de óxidos totales se calcularon los índices de alteración y meteorización; se relacionaron los diferentes componentes químicos en general expresados en porcentaje en Peso (% W).

7.4.3.1 Índice de meteorización *Relación de Ruxton* (Price & Velbel, 2002)

$$R = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$

Este índice de meteorización simple, se ha denominado la relación de Ruxton, por varios autores. Es el más adecuado para los perfiles de meteorización desarrollados en rocas de composición ácida a intermedia, que producen caolinita o alofana (Price & Velbel, 2002). Este índice de Meteorización relaciona la pérdida de sílice con la pérdida total de los elementos y considera la alúmina (y otros sesquióxidos) como inmóviles durante la meteorización. La Relación de Ruxton se ha empleado en perfiles de meteorización desarrollados en rocas ígneas y rocas metamórficas de regiones húmedas alrededor del mundo.

Figura 63: Relación de Ruxton (R).



Según los datos obtenidos en el Laboratorio, la Relación de Ruxton durante la evolución del Perfil de Meteorización se presenta de manera decreciente, (Fig. 63) mostrando que la concentración de Sílice disminuye con el aumento de la meteorización, considerando que la alúmina se comporta de manera constante. Para el perfil de meteorización de Granodiorita, la relación de Ruxton es menos variable encontrándose valores entre 4 – 5 para los intervalos I y II correspondientes a Roca Fresca y roca Ligeramente Meteorizada y valores entre 3 – 4 para los intervalos del III: Moderadamente meteorizado, IV: Altamente Meteorizado, V: Completamente meteorizado y VI: Suelo Residual. El perfil de meteorización néisico se desarrolla en un rango mayor, obteniendo valores oscilantes entre 7 – 8 para el intervalo I y 2 – 3 para el intervalo VI, mostrando que el Neis tiene una pérdida mayor de sílice en relación con la alúmina y en comparación con el perfil de Meteorización desarrollado por la Granodiorita.

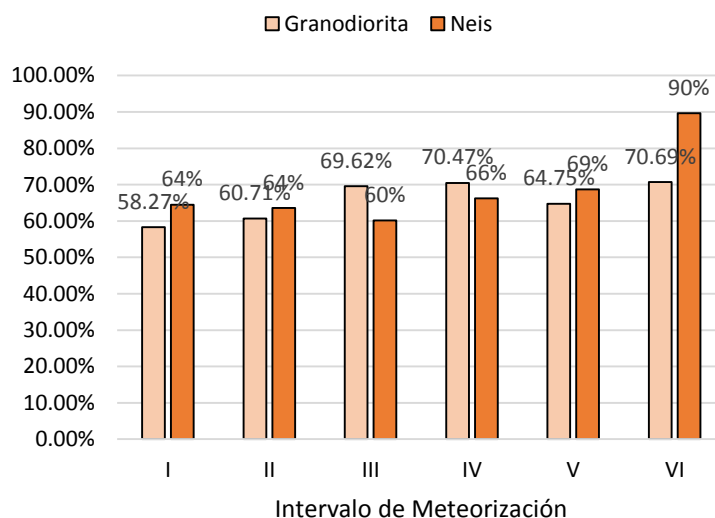
7.4.3.2 Índice de Alteración Química CIA (Nesbitt y Young, 1984 y 1989)

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \times 100$$

Donde el CaO^* es la cantidad de CaO incorporado en la fracción de silicato de la roca.

Asumiendo un comportamiento inmóvil de la Alúmina, las variaciones en la CIA reflejan cambios en la proporción de feldespatos y de varios minerales arcilla desarrollados en los perfiles (Aristizabal et al., 2009). Altos valores de CIA reflejan la pérdida de elementos móviles relativos a los constituyentes residuales estables durante la meteorización, y bajos valores de CIA indican la ausencia de alteración química (Nesbitt y Young, 1984 y 1989). Las Rocas y minerales frescos sin importar su composición tienen valores de CIA que oscilan entre 40 -50, mientras que las muestras que se encuentran completamente meteorizadas tienen valores cercanos a 100 (Aristizabal et al., 2009).

Figura 64: Índice de Alteración Química (CIA).



Para los perfiles de meteorización del presente estudio, se obtuvo un índice de alteración que corresponde a lo que en la bibliografía se ha dicho (Fig. 64). En el Perfil de roca Granodiorítica se observa que el CIA tiene valores de 50% – 60% en el intervalo I correspondiente a Roca Fresca, concordando que es un estado en el que no hay cambios en los elementos químicos, mientras que para el intervalo VI correspondiente a Suelo residual, el CIA alcanza valores de 70%, evidenciando el avance moderado de la alteración química de los minerales constituyentes. Para el Perfil de roca Néisica se evidencia mejor la alteración química, teniendo que para el intervalo I los valores oscilan entre 60% - 70% y para el Intervalo VI los valores llegan muy cercanos a 90%.

7.5 ENSAYO DE POROSIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DEL POROSÍMETRO DE HELIO (BASADO EN LA LEY DE BOYLE) (NORMA API RP-40)

Conceptos acerca de los tipos de porosidad.

- Porosidad total o absoluta es una medida del espacio vacío total, tanto conectado como aislado, en la muestra de roca. Este puede ser determinado con la medición del volumen total, el peso seco y el volumen del grano en una muestra disgregada.

$$\Phi_A = \text{espacios poroso totales Roca} / \text{volumen total de roca}$$

- Porosidad efectiva: volumen poroso interconectado ocupado por fluidos libres.

$$\Phi_e = \text{espacios poroso interconectados} / \text{volumen total de roca}$$

- Porosidad no efectiva: se define como la diferencia entre porosidad absoluta y porosidad efectiva.

$$\Phi_{NE} = \Phi_A - \Phi_e$$

Resultados

Los resultados arrojados en esta prueba mediante el método del Porosímetro de Helio se sustenta bajo el principio de la Ley de Boyle, la cual se define como, el volumen de una masa dada de gas ideal varia inversamente con su presión absoluta, cuando la temperatura permanece constante, representada en la siguiente ecuación.

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Una de las ventajas de usar este método es la exactitud, si se logra realizar una buena calibración del equipo, este determinara el volumen de grano con precisión de $\pm 0.2 \%$ del valor real. Esto corresponde aproximadamente a $\pm 0.1 \text{ cm}^3$ en muestras de $1 \frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de largo (API RP 40) que son las medidas que corresponden a los Plugs o núcleos utilizados.

- ✓ cálculo del volumen de conexiones

En el cálculo del volumen de conexiones (V2) se utilizaron las lecturas P_v , P_i y P_f arrojadas al introducir los discos calibrados dentro de la cámara sin el núcleo o Plug en el Porosímetro.

$$V_2 = (P_i - P_f) * (V_1 + V_3) / P_f - P_v$$

Donde:

V_2 : volumen de conexiones en cm^3

V_1 : 40.66 cm^3

V_3 : 7.70 cm^3

P_i : Presión inicial en psi

P_f : Presión final en psi

P_v : Presión de vacío en psi

✓ Cálculo de volumen de granos V_g

Para el cálculo de volumen de granos V_g se utilizó la siguiente formula.

$$V_g = V_{\text{DNU}} - X$$

Donde:

V_{DNU} : El volumen de discos no utilizados (Tabla 13)

X : Representa el volumen de espacios vacíos entre los discos y el volumen de la muestra.

$$X = \frac{(P_i - P_f) * (V_1 + V_3) + V_2 * (P_v - P_f)}{P_f - P_v}$$

TABLA 13: Volumen de los discos determinado por el fabricante de los discos.

VOLUMEN DE DISCOS	
DISCO	1,5"
1	43,293
2	28,960
3	21,760
4	7,282

✓ Cálculo de la porosidad

Finalmente la porosidad por el método del Porosímetro de helio, se calculó así:

$$\Phi = (1 - Vg/Vb) * 100$$

Donde:

Φ : Es la porosidad expresada en porcentaje

Vg : Es el volumen de granos

Vb : Es el volumen total de la muestra cilíndrica.

Interpretación de resultados

Los valores calculados para cada intervalo de meteorización se observan en la Tabla 14, incluyendo la clasificación propuesta por Ardila y Arenas (2010), la cual divide los porcentajes de porosidad en los siguientes rangos Alta porosidad, mayores del 20%. Buena porosidad, entre el 15 y 20 %. Regular, entre 5 y 15 % y mala porosidad menores del 5%.

En González (2002), se aprecian valores de porosidad a diferentes tipos de rocas, definiendo valores de 0.5-1.5% a Granitos y Neises, lo que conduce a afirmar que los procesos de meteorización sufridos en las rocas del presente estudio (Pulso

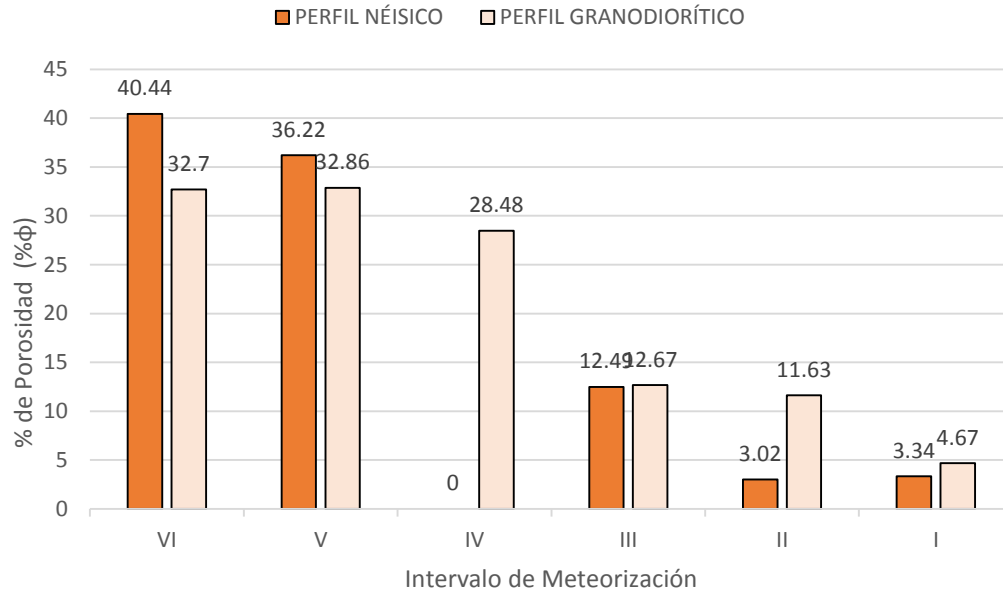
Granodiorítico y Neis Cuarzo Feldespático) incrementan los porcentajes de porosidad a medida que aumentan cada uno de los perfiles de meteorización.

TABLA 14: Datos obtenidos del Ensayo de porosidad para el perfil de Roca Neísica (superior) y Perfil de Roca Granodiorítica (inferior).

PERFIL NÉISICO				
INTERVALO DE METEORIZACIÓN	ESTACIÓN	MUESTRA	$\phi = 1 - (V_g/V_{total})$	CLASIFICACIÓN SEGÚN ARDILA Y ARENAS (2010)
VI	E11	ACM-VI-11-18	40,44	ALTA
V	E10	ACM-V-10-20	36,22	
IV	E3	ACM-IV-03-27	-	
III	E7	ACM-III-07-24	12,49	REGULAR
II	E26	ACM-II-26-04	3,02	MALA
I	E1	ACM-I-01-29	3,34	
PERFIL GRANODIORÍTICO				
INTERVALO DE METEORIZACIÓN	ESTACIÓN	MUESTRA	$\phi = 1 - (V_g/V_{total})$	CLASIFICACIÓN SEGÚN ARDILA Y ARENAS (2010)
VI	E23	AC-VI-23-12	32,7	ALTA
V	E32	AC-V-32-15	32,86	
IV	E27 ZONA 1	AC-IV-27-08	28,48	
III	E27 ZONA 2	AC-III-27-06	12,67	REGULAR
II	E20	AC-II-20-34	11,63	
I	E24	AC-II-24-13	4,67	MALA

Este tipo de porosidad es inducida o secundaria en la cual contribuyen además procesos geológicos, fracturamiento y disolución de material por corrientes de agua subterránea o meteórica. Según Sanders (1998) la porosidad eficaz para rocas ígneas y metamórficas sin fracturar es de 0.0005 % y para estas mismas fracturadas es de 0.0005 – 0.01 % lo que permite reconocer que la meteorización influye en la formación de espacios propicios para la retención de agua evidenciados en los valores de porosidad obtenidos mediante el Porosímetro de Helio.

Figura 65: Porcentaje de porosidad efectiva.



7.6 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general de este trabajo es generar un modelo conceptual de meteorización para el neis de Bucaramanga y la roca Granodiorítica, aquí se recopila toda la información obtenida en los análisis físicos y geoquímicos que se utilizaron con el fin de evidenciar las características de cada perfil de meteorización.

7.6.1 Perfil de roca Neísica. Este perfil se caracterizó a partir de las estaciones E1: Intervalo I – Roca Fresca, E26: Intervalo II – Roca ligeramente meteorizada, E7: Intervalo III: Roca moderadamente meteorizada, E3: Intervalo IV – Roca altamente meteorizada, E10: Roca completamente meteorizada y E11: Intervalo VI – Suelo residual.

La Figura 66, muestra cada una de las técnicas aplicadas y la tendencia en el comportamiento del perfil de meteorización (no se incluye el análisis granulométrico y el porcentaje de humedad relativa) a partir de los datos tomados en campo y las

muestras de mano de cada estación, como el rebote del martillo de Schmidt, el grado de resistencia mecánica, la decoloración, el porcentaje de oxidación y el porcentaje de minerales arcillosos.

El rebote del martillo de Schmidt es más alto en los intervalos menos meteorizados (I y II) presentando valores promedio de 46.6 y 40.6 respectivamente, mientras que para el intervalo VI, correspondiente al suelo residual el promedio del rebote del martillo fue 14.9, de esta manera, los valores del martillo de Schmidt y el grado de resistencia mecánica disminuyen a medida que se incrementa la meteorización. Por otra parte la decoloración, el porcentaje de oxidación y el porcentaje de minerales arcillosos, va aumentando a medida que aumenta la meteorización, tendencia que es mostrada de la figura 66; en el intervalo I, el porcentaje de minerales oxidados esta entre el 5% (interior de la muestra) y un 50% (en los planos de fractura), mientras que para el intervalo VI, la oxidación de minerales es uniforme con un porcentaje de 50 - 60%, el porcentaje de minerales arcillosos varían de 3 - 10% en el intervalo I y para el intervalo VI el rango que abarca es de 60 - 70%. En la figura 66 se insertan imágenes representativas de varias de las características analizadas.

El porcentaje de porosidad estimada en el perfil de roca néisica, va aumentando a medida que aumenta la meteorización (Véase figura 66), demostrado en los resultados obtenidos para el ensayo de porosidad mediante el método del Porosímetro de helio valores bajos como 3.34% de espacios vacíos para el intervalo I y 40.44% de espacios vacíos para el intervalo VI.

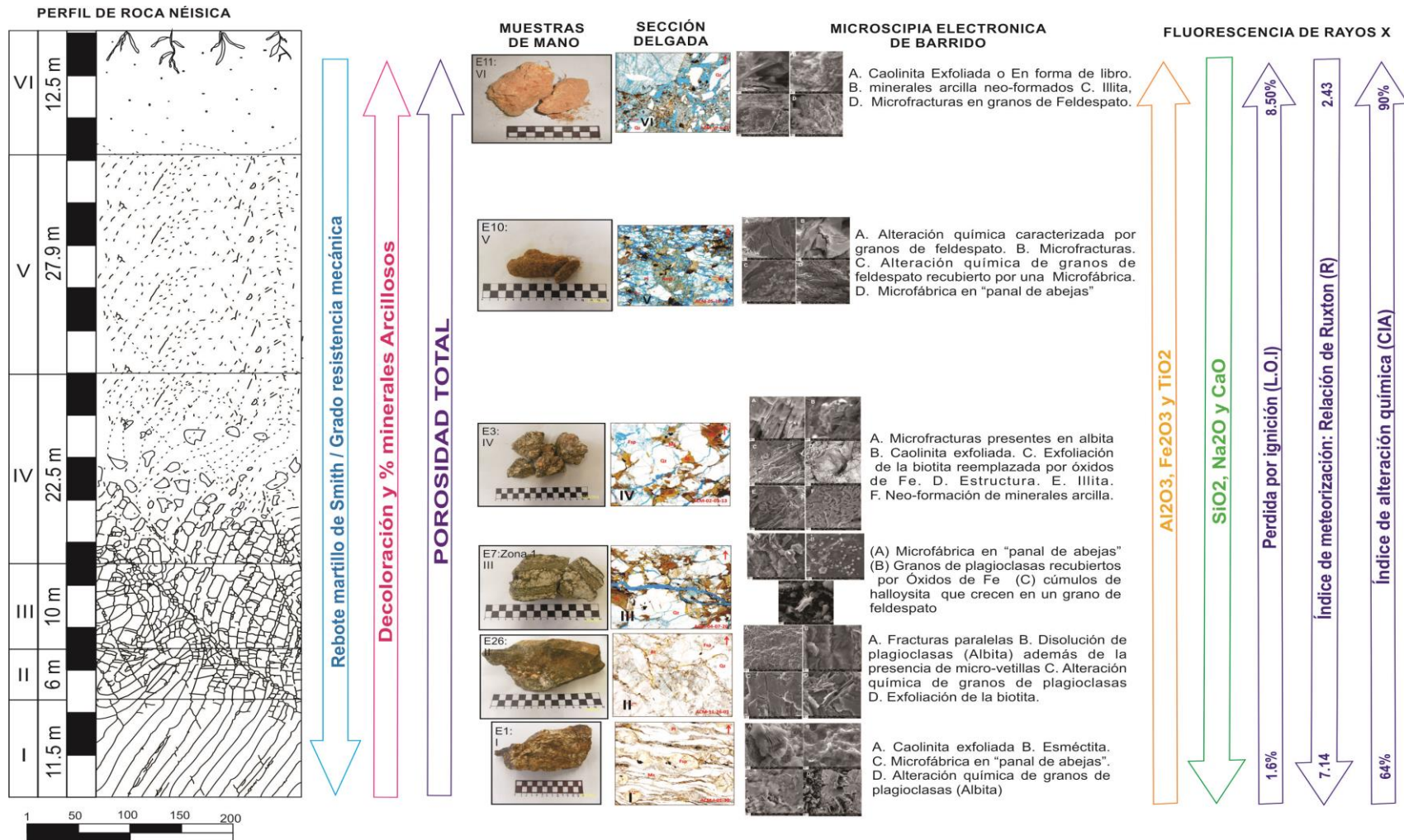
Las secciones delgadas de este perfil, dejan ver, a partir del aumento de la superficie del aglutinante con tinción azul, el aumento de la porosidad este aglutinante rellena los poros causados por la disolución y las microfracturas (porosidad secundaria) (Figura 66), con valores que van desde 0.6 a 19.5%, siendo este último otorgado al intervalo VI de meteorización. La composición mineralógica de estas rocas está representada principalmente por la presencia de Cuarzo, Feldespato potásico, Plagioclasa, Biotita, Moscovita, como minerales principales,

Anfíboles, Granate, Piroxenos y Sillimanita como minerales accesorios y Epidota como mineral de alteración.

La microscopia electrónica de barrido realizada al perfil de roca neísica permitió observar microestructuras como la microfábrica en “panal de abejas” en los intervalos I y III, y el reconocimiento de minerales de arcilla desde el primer intervalo de meteorización como Esméctica y Vermiculita así mismo Caolinita en los Intervalos I, IV y VI, la formación de micro-fracturas paralelas en el intervalo II, evidenciadas nuevamente en el intervalo IV en granos de Albita, intervalo V e intervalo VI en granos de feldespato. La Disolución (“corrosión”) en plagioclasas es propia del intervalo II, mientras que la alteración química de granos de Plagioclasa (Albita) se identificó en los intervalos I, II y V en este último en granos de Feldespato recubiertos por Microfábrica. La presencia de óxidos de Fe se evidencia en el Intervalo III y Halloysita; mientras que la Illita y neo-formación de minerales de arcilla solo se identificó en los intervalos IV y VI.

Con respecto al análisis de Fluorescencia de Rayos X aplicado al perfil de roca neísica se observó que a medida que aumenta la meteorización las pérdidas por Ignición (L.O.I) aumentan (Figura 66). Los óxidos mayores en el perfil de Roca Neísica presentan un orden de abundancia $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{TiO}_2$, de los cuales el Al_2O_3 , Fe_2O_3 y el TiO_2 aumentan su contenido con el aumento de la meteorización como en Aristizabal (et al., 2009), mientras el Na_2O y CaO disminuyen su concentración hasta llegar al 0% en el intervalo VI que corresponde a Suelo Residual. En el índice de Meteorización (R) se observa claramente que la sílice disminuye con respecto a la alúmina durante todo el perfil (Figura 66), mostrando un valor alto para el intervalo I de 7.14 y un valor bajo para el intervalo VI de 2.43; el índice de Alteración Química (CIA) se observa que el perfil de roca Neísica es considerablemente susceptible (Figura 66) a la alteración ya que presenta un rango amplio en los datos (Aristizabal et al., 2009) desde el intervalo I con valores cercanos al 60% y en el intervalo VI valores cercanos al 90%.

Figura 66. Recopilación de los resultados obtenidos a partir de las pruebas físico químicas aplicadas a las muestras recolectadas para el perfil de roca Néisica.



7.6.2 Perfil de roca Granodiorítica. Este perfil se caracterizó a partir de las estaciones E24: Intervalo I – Roca Fresca, E20: Intervalo II – Roca ligeramente meteorizada, E27 ZONA 2: Intervalo III - Roca moderadamente meteorizada, E27 ZONA 1: Intervalo IV – Roca altamente meteorizada, E32: Intervalo V - Roca completamente meteorizada y E23: Intervalo VI – Suelo residual. La Figura 67 muestra las técnicas aplicadas con las que se llevó a cabo la caracterización de este perfil (no se incluye el análisis granulométrico y la prueba del porcentaje de humedad relativa).

A partir de los datos tomados en campo y las muestras de mano de cada estación, teniendo en cuenta el rebote del martillo de Schmidt quien es más alto en el intervalo de meteorización I: roca fresca, con un valor promedio de 46.5, mientras que para el intervalo VI, correspondiente al suelo residual es de 10.7, como se muestra en la figura 67 los valores del martillo de Schmidt y el grado de resistencia mecánica disminuyen a medida que se incrementa la meteorización. Por otra parte el porcentaje de oxidación y el porcentaje de minerales arcillosos fueron obtenidos mediante la aplicación de diagramas para la determinación aproximada del porcentaje en volumen de minerales en una roca (Mantilla., 2003) cuyos valores van aumentando a medida que aumenta la meteorización de igual manera la decoloración (Figura 67); en el intervalo I el porcentaje de minerales oxidados esta entre 2% (interior de la muestra) y un 40% (en los planos de fractura) mientras que para el intervalo VI, la oxidación de minerales es uniforme con un porcentaje de 30-40%; el porcentaje de minerales arcillosos varían de 2%-20% en el intervalo I y para el intervalo VI el rango que abarca es de 50 - 70%. Las características anteriormente mencionadas se pueden equiparar de igual manera con la fotografía de muestras de mano correspondiente a cada intervalo de meteorización (Figura 67).

El porcentaje de porosidad evaluado en el perfil de roca Granodiorítica, mediante el método del Porosímetro de helio, muestran un incremento de espacios vacíos a medida que aumenta el grado de meteorización (Figura 67), así los valores bajos de porosidad como 4.67% correspondientes al intervalo I y 32.7% para el intervalo

VI clasificándose así al intervalo I con mala porosidad y al VI alta porosidad según Ardila y Arenas (2010).

Las secciones delgadas de este perfil, muestran los mismos resultados de porosidad arrojados mediante conteo de 200 puntos estableciendo un porcentaje para cada intervalo de meteorización y que igualmente aumenta a medida que avanza el grado de meteorización con valores que varían de 0% para el intervalo I y 27.2% para el intervalo VI, siendo este el de mayor porcentaje. La composición mineralógica de este tipo es Cuarzo, Feldespato potásico, Plagioclasa, Biotita, Moscovita quienes hacen parte de los minerales principales, los Piroxenos y minerales opacos como parte de los minerales accesorios y la Epidota y Clorita como minerales de alteración.

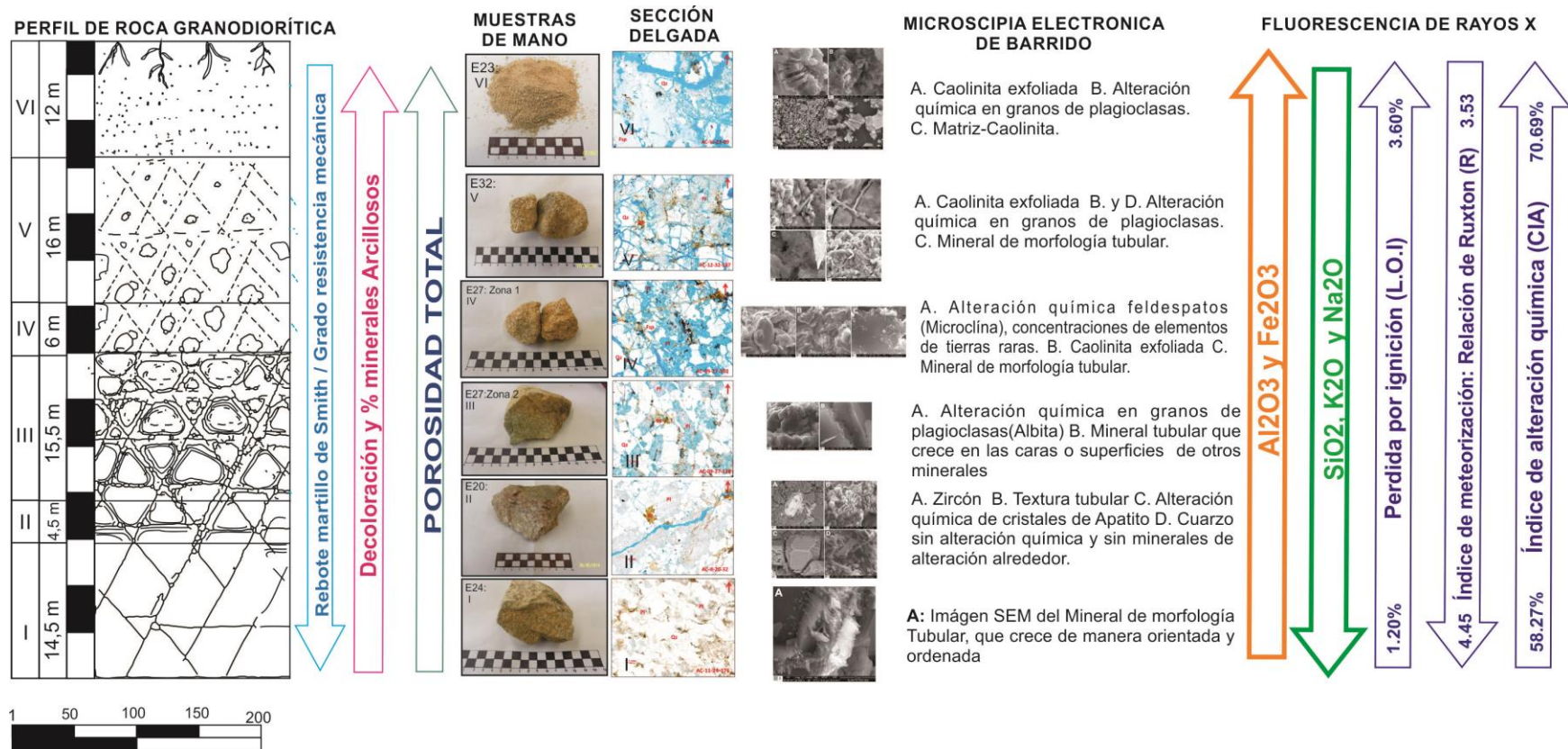
La microscopia electrónica de barrido realizada al perfil de roca Granodiorítica permitió identificar algunos minerales como Cuarzo, Albita, Microclina y Moscovita encontrados de manera constante, es decir aparecen en todos los intervalos de meteorización. Desde el primer intervalo de meteorización hasta el V, se observó un mineral de morfología Tubular siendo este un aluminosilicato con Fe; la alteración química aparece en el intervalo II y va hasta el VI principalmente en granos de Plagioclasa, se identificó además a minerales arcillosos como la Caolinita en los intervalos IV, V y VI aumentando en cantidad hasta formar matriz (intervalo VI).

En los resultados obtenidos de Fluorescencia de Rayos X se observa que para este perfil las pérdidas por Ignición (L.O.I) van aumentando progresivamente con respecto al promedio de los datos con el grado de meteorización, concordando con lo descrito por Aristizábal (2009) y con respecto al comportamiento de los óxidos mayores el orden de abundancia presentado es $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{TiO}_2$, de los cuales el K_2O , Na_2O y CaO se comportan de manera móvil variando durante todo el perfil de roca Granodiorítica.

En los diagramas de variación de este mismo perfil, se identificaron relaciones positivas del aluminio con respecto al Fe_2O_3 y TiO_2 evidenciando su incremento con el avance de la meteorización, fenómeno que también es evidenciado en Aristizabal

(2009). El índice de meteorización (R) muestra que el SiO_2 disminuye con el aumento de la meteorización y el Índice de Alteración Química (CIA) muestra que la meteorización se encuentra dentro de los valores estándar, donde el Intervalo VI que corresponde al Suelo Residual presenta valores cercanos al 70%.

Figura 67: Recopilación de los resultados obtenidos a partir de las pruebas físico químicas aplicadas a las muestras recolectadas para el perfil de roca Granodiorítica.



8. DISCUSIÓN

Con el presente trabajo, se pretendió, generar un modelo conceptual de la meteorización de las rocas Metamórficas y Ígneas que componen el Macizo de Santander, escogiendo de estas litologías, al Neis de Bucaramanga y a la roca Granodiorítica a las cuales se les realizaron pruebas geoquímicas y físicas para la caracterización de los correspondientes perfiles de meteorización, definiendo valores de porosidad, humedad relativa, análisis granulométrico y presencia de micro-fracturas observadas en sección delgada como criterios hidrogeológicos básicos para ambos perfiles de meteorización.

8.1 PERFIL DE ROCA NEÍSICA

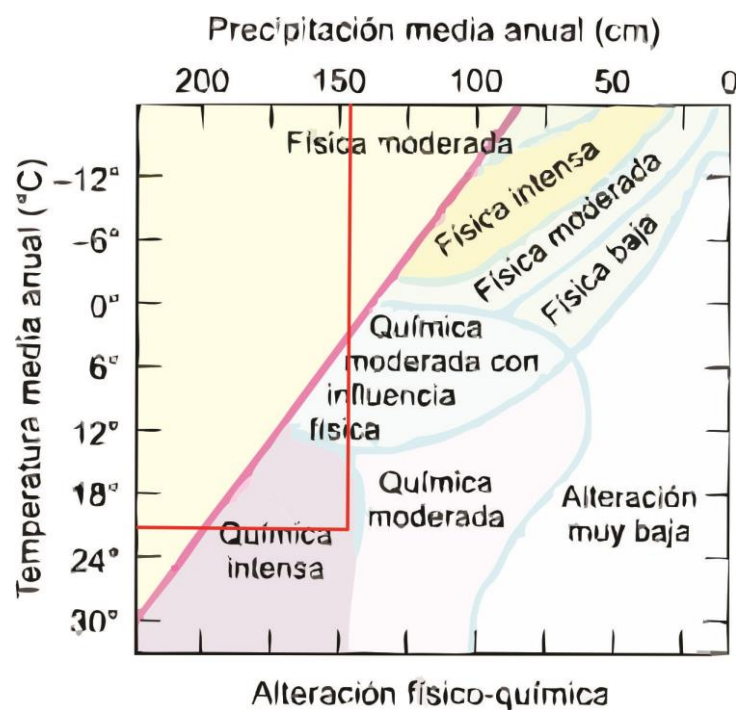
En el perfil de Roca Neísica el porcentaje de finos es predominante en el intervalo VI (28.73%) correspondiente al suelo Residual. En general para este perfil el tamaño de grano predominante es el tamaño de arena gruesa y muy gruesa (0.5 mm - 2mm de diámetro). Con respecto a la humedad se observa que los valores más altos corresponden a los intervalos III, V y VI, siendo el intervalo V: roca completamente meteorizada quien presenta el mayor porcentaje de humedad relativa (8.07%); los intervalos III y V, se correlacionaron con los datos obtenidos en microscopia electrónica en los que se observó la micro fabrica en “Panal de abejas” la cual González (2002) define como estructuras abiertas formadas por folículos de partículas de arcillas unidas entre sí por fuerzas de adherencias aumentando la porosidad de la roca⁶, además en sección delgada del intervalo III muestra la aparición de micro-fracturas que atraviesan la roca.

Para los diagramas de variación el Al_2O_3 , Fe_2O_3 y TiO_2 aumentan progresivamente con la meteorización como la indica Aristizabal et al., 2009.

⁶ (González et al., 2002) Ingeniería Geológica, Capítulo II: Mecánica de Suelos, microfábrica de Suelos Arcillosos: pág. 96.

Los resultados obtenidos en Fluorescencia de rayos X presentan valores de L.O.I de 1.6% llegando a 8.50% y valores de CIA de 64% a 90% tanto para el intervalo I y VI respectivamente. Aristizabal (2009), establece que sin importar la litología, los valores de CIA en el intervalo I están alrededor de 50 y para el intervalo VI son cercanos a 100, teniendo relación con los valores mencionados anteriormente, indicando una meteorización química extrema según Domínguez (2011), y meteorización química intensa según González (2002), el cual tienen en cuenta la temperatura y precipitación en donde se desarrolle el perfil de meteorización, para nuestra zona el perfil de roca Neísica se desarrolla a una altura promedio de 1536 m.s.n.m., ubicándolo en el piso térmico Templado, con temperaturas entre 18°C - 24°C, y precipitación anual de 140 cm o 1400 mm (sección 1.3.5 precipitación) Utilizando la gráfica de relación entre el clima y los procesos de meteorización mostrada en González (2002), nuestra zona con estas condiciones climáticas, cuenta con procesos de meteorización química intensa para el perfil de roca Neísica (Figura 68).

Figura 68: Relación entre clima y meteorización, tomado de González (2002)



Para el contenido de óxidos mayores en el perfil de roca Néisica, se identificó que, el Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , CaO y Na_2O , se comparten de manera móvil. La disminución del CaO y Na_2O , durante el perfil, se correlacionó con los datos mineralógicos de sección delgada y SEM; la disolución de plagioclasas va aumentando progresivamente a medida que aumenta el perfil de meteorización, en estas técnicas se identificó albita (compuesta de Na y Al), en intervalo III, mientras que en el VI, se encuentra ausente; en sección delgada los porcentajes de Plagioclasa igualmente disminuyen, pasando del 26% en roca moderadamente meteorizada (Intervalo III) hasta un 1.8% en suelo Residual (Intervalo VI).

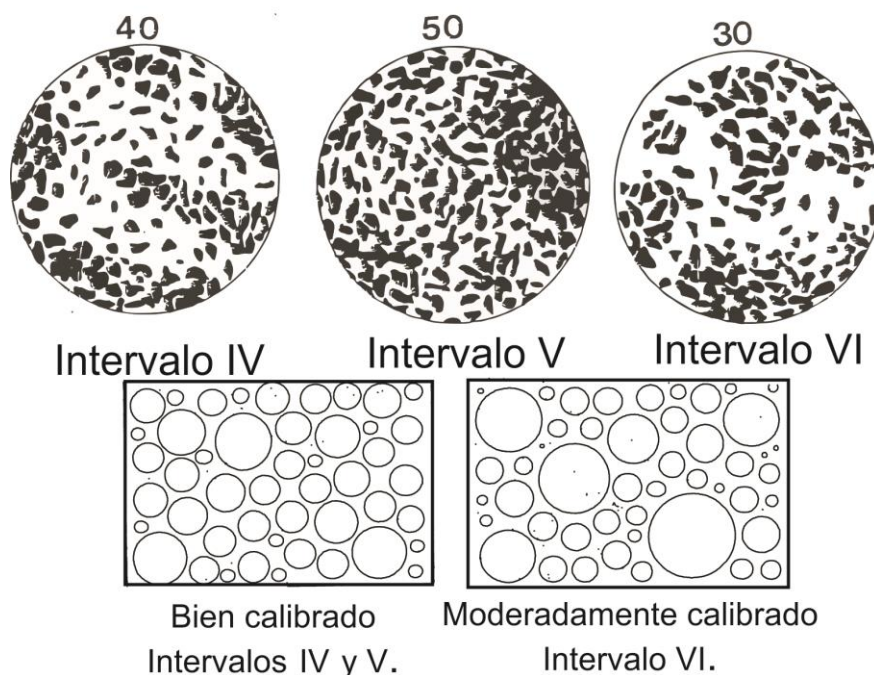
El aumento del contenido de Hierro (Fe) se evidencia a medida que aumenta la meteorización con valores de 2.69% a 6.43%, intervalos I y VI respectivamente, estos cambios de porcentaje analizados en FRX se complementan con los encontrados en lamina delgada con valores de 5.4% en óxidos de Fe (Hematita y limonita) para intervalo VI y 4.8% óxidos de Fe (limonita) en intervalo I, además concuerda con el pico de humedad en el intervalo VI, siendo el agua un agente que contribuye en procesos químicos de meteorización, en el análisis mediante SEM se observó para el intervalo VI picos de Fe y cristalización de minerales arcilla de Illita quienes tienen en su composición química Fe.

8.2 PERFIL DE ROCA GRANODIORÍTICA

En el perfil de Roca Granodiorítica se observa que el tamaño de grano predominante es el tamaño arena gruesa y muy gruesa que va de 0.5 mm a 2 mm de diámetro (Cruz y Caballero, 2007), los cuales aumentan progresivamente hasta el intervalo V con un 50.45% y que en el intervalo VI desciende a 34.93%. Con respecto a los finos, está claro que el intervalo VI es el que tiene mayor proporción (24.35%) con respecto a los demás intervalos. A partir de estos porcentajes en el tamaño de grano se tiene en cuenta a los intervalos IV, V y VI ya que han perdido la resistencia mecánica y la cohesión entre cristales o granos y se comportan como depósitos de roca no consolidada, determinándose en esta medida la uniformidad en el tamaño de grano (Calibrado) que tiene relación con los espacios vacíos existentes entre las partículas definiéndose así valores altos de porosidad a bien calibrado (intervalos

IV y V) y moderadamente calibrado por la presencia de proporciones semejantes en partículas tamaño arena y finos (intervalo VI). Los valores obtenidos mediante la prueba del Porosímetro de Helio son 28.48%, 32.86% y 32.7% a intervalo IV, V y VI respectivamente. (Figura 69)

Figura 69: Porcentajes del tamaño de grano en los intervalos IV (Altamente meteorizado), V (Roca completamente meteorizada) y VI (Suelo residual) y su relación con el calibrado.



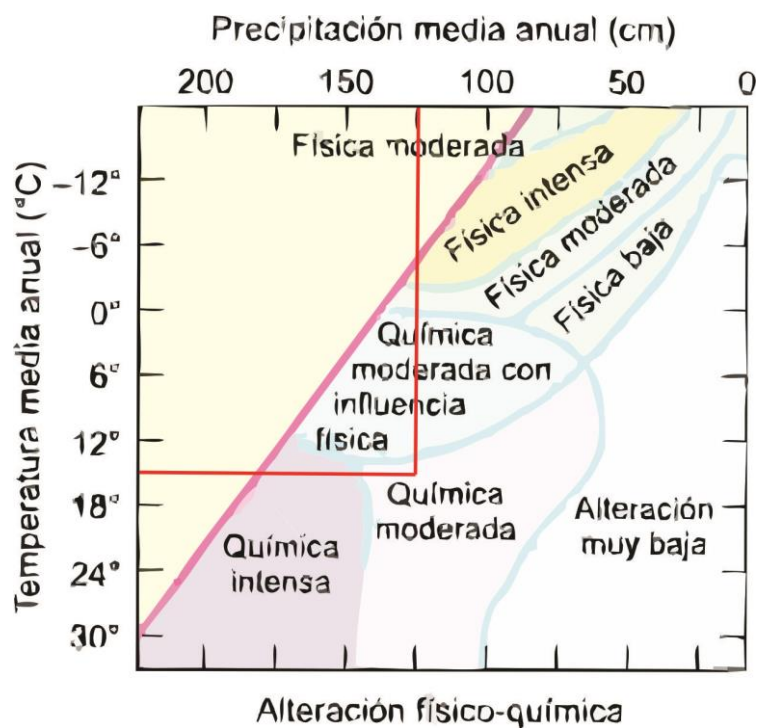
Para el análisis de Humedad de este mismo perfil se identificó que los intervalos II, V y VI son los que presentan mayor contenido de agua dentro de la muestra, resaltando que el intervalo V fue el mayor con un valor de 8.42%, teniendo relación con los resultados de un buen calibrado y alta porosidad para este mismo intervalo. Por otro lado la humedad encontrada en el intervalo II (Roca ligeramente meteorizada), es la “capa fisurada” mencionada en Dewandel (2006), de interés Hidrogeológico, en este intervalo la roca presenta microfracturas que atraviesan la misma; observadas en lámina delgada, aumentando la cantidad de espacios vacíos en comparación con la muestra que pertenece al intervalo de meteorización I. Según el análisis de Microscopia electrónica de barrido, en el intervalo II aparece la

Caolinita y que según González (2002), pertenece al grupo del caolín los cuales atrapan dentro de su estructura moléculas de agua teniendo relación con el porcentaje de humedad obtenido y las micro-fracturas observadas en sección delgada.

Los resultados obtenidos en Fluorescencia de rayos X presentan valores de L.O.I de 1.20% llegando a 3.6% y valores de CIA de 58.27% a 70.69% tanto para el intervalo I y VI respectivamente, este último valor indica una meteorización química moderada según Domínguez (2011) y González (2002) lo relaciona con la temperatura y precipitación en donde se desarrolle el perfil de meteorización, para nuestra zona el perfil de roca Granodiorítica se desarrolla a una altura promedio de 2164 m.s.n.m., ubicándolo en el piso térmico Frío, con temperaturas entre 12°C - 18°C, y precipitación de 125 cm (1250 mm). Utilizando la gráfica de relación entre el clima y los procesos de meteorización mostrada en González (2002)⁷, nuestra zona con estas condiciones climáticas, cuenta con procesos de meteorización química moderada (Figura 70).

⁷ Gonzales (2002). Ingeniería geológica. Capítulo 3: Mecánica de rocas, 136 pp.

Figura 70: Relación entre clima y meteorización, tomado de González (2002).



Para el contenido de óxidos mayores en el perfil de roca Granodiorítica, se identificó que el Fe_2O_3 , Al_2O_3 y TiO_2 , se comparten de manera móvil, aumentando durante el desarrollo del perfil, mientras que el CaO y Na_2O disminuyen a medida que el perfil de meteorización se intensifica. Para la disminución del Na_2O , durante el perfil, se correlacionaron los datos mineralógicos de SEM y Sección Delgada en SEM, la disolución de plagioclasas va aumentando progresivamente a medida que aumenta el perfil de meteorización, en esta técnica se identificó albita, la cual está compuesta de Na y Al y presenta estructuras de disolución, en sección delgada los porcentajes de la Plagioclasa igualmente disminuyen, pasando de 26.6% en la Roca Fresca (Intervalo I) hasta un 8.4% en el suelo Residual (Intervalo VI).

9. CONCLUSIONES

- La cartografía a detalle escala 1:10.000 realizada en la micro-cuenca del río Lato, permitió identificar dos unidades litológicas, el Neis de Bucaramanga de edad precámbrica (Royero et al, 2001) y el Grupo plutónico de Santander de edad Jurásica inferior a medio. Este último compuesto por pulsos de Diorita, Granodiorita-Tonalita, Cuarzomonzonita gris y Monzogranito.
- En estas rocas cristalinas presentes en el macizo de Santander al oriente del área metropolitana, el perfil de meteorización se desarrolla en seis intervalos de meteorización, teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas de este tipo de rocas. Los intervalos caracterizados de acuerdo a la intensidad de la meteorización son Intervalo I – Roca Fresca, Intervalo II – Roca ligeramente meteorizada, Intervalo III - Roca moderadamente meteorizada, Intervalo IV – Roca altamente meteorizada, Intervalo V - Roca completamente meteorizada e Intervalo VI – suelo residual.
- La caracterización del perfil de roca Néisica y perfil de roca Granodiorítica se llevó a cabo a partir de datos tomados con el martillo de Schmidt, en cada uno de los intervalos, mostrando una disminución a medida que aumentaba el intervalo de meteorización, así que valores altos de rebote corresponden a intervalos bajos del perfil y valores bajos del rebote a intervalos superiores del perfil de meteorización.
- La sumatoria de los espesores en cada intervalo de meteorización para el perfil de roca Néisica es de 90.4 m y 68.5 m para el perfil de roca Granodiorítica.
- Sin importar la litología los perfiles de meteorización presentan un aumento en el porcentaje de minerales oxidados y una disminución de coloración a medida que aumenta el intervalo de meteorización.

- El desarrollo de minerales arcillosos observados a escala de afloramiento y muestras de mano va ascendiendo de roca fresca - intervalo I a suelo residual - Intervalo VI, producto de procesos físico-químicos en ambos perfiles de meteorización.
- Ambos perfiles desarrollan suelos de grano grueso, ya que el tamaño de grano predominante (más del 50%) es mayor de 0.075 mm (% Retenido tamiz n° 200; ASTM), según González (2002).
- Con respecto a la humedad relativa en ambos perfiles de meteorización el intervalo V, correspondiente a roca completamente meteorizado presenta valores alrededor de 8%, correspondiendo a suelos granulares (Arenas y Gravas) como lo menciona González (2002) para estos valores.
- La porosidad obtenida mediante el Porosímetro de helio y la encontrada en secciones delgadas a partir de conteo de poros, muestra una transición durante el desarrollo del perfil de meteorización de roca Néisica y roca Granodiorítica de mala porosidad para roca fresca - intervalos I a alta porosidad suelo residual - intervalo VI.
- La aparición de micro-fracturas son evidenciadas a partir del intervalo III de meteorización, aumentando a medida que se desarrolla el perfil de meteorización Néisica, mientras que para el perfil de meteorización Granodiorítico las micro-fracturas observadas en sección delgada aparecen en el intervalo de meteorización II e igualmente aumentan con el avance de la meteorización.
- Se identificaron minerales arcilla mediante SEM como Esméctica y Vermiculita para intervalo I, Caolinita en los Intervalos I, IV y VI, Halloysita intervalo III e Illita en intervalos IV y VI, para el perfil de roca Néisica mientras que para el perfil Granodiorítico se evidencio un mineral de morfología Tubular en intervalos I, II, III, IV y V y Caolinita en los intervalo IV, V y VI

aumentando hasta formar matriz (intervalo VI). siendo la Caolinita constante en los últimos intervalos para ambos perfiles.

- Se establece mediante FRX, pérdidas por ignición (L.O.I) a medida que aumenta la meteorización tanto para el perfil de roca Néisica como para el perfil de roca Granodiorítica.
- El índice de meteorización de Ruxton (R) disminuye a medida que aumenta el intervalo de meteorización para ambos perfiles de meteorización.
- El índice de Alteración Química (CIA), aumenta con el grado de meteorización, clasificándose además mediante los valores obtenidos como meteorización química extrema o intensa, para el perfil de roca Néisica y meteorización química moderada para el perfil de roca Granodiorítica, en donde se incorporaron datos de temperatura y precipitación para dichas clasificaciones.
- Los intervalos de meteorización que presentan potencial hidrogeológico para el perfil de Roca Granodiorítica, son el Intervalo II: Roca Ligeramente Meteorizada y el intervalo V: Roca Completamente Meteorizada, ya que estos estadios de meteorización, presentan picos humedad, micro fracturas, regulares y altas porosidades respectivamente.
- Los intervalos de meteorización que presentan potencial hidrogeológico para el perfil de Roca Neísica, son el Intervalo III: Roca moderadamente Meteorizada y el intervalo V: Roca Completamente Meteorizada, ya que estos estadios de meteorización, presentan picos humedad, micro fracturas, regulares y altas porosidades respectivamente.
- El intervalo V: Roca Completamente meteorizada que se presenta en ambos perfiles de meteorización, podría cumplir una función capacitiva o de almacenamiento de agua, según Dewandel (2006).

10. RECOMENDACIONES

- Realizar caracterización de perfiles de meteorización a los demás pulso que conforman el Grupo Plutónico de Santander (Tonalita, Diorita y Cuarzomonzonita).
- Realizar varias veces la misma prueba para cada intervalo de meteorización en técnicas como porcentaje de humedad relativa y Granulometría para tomar un promedio de los datos y así estos sean más confiables.
- En la técnica realizada de microscopia electrónica de barrido se identificó un mineral de morfología tubular, el cual es similar al Crisotilo (grupo de la serpentina) pero mediante el EDS corresponde a un aluminosilicato con Fe, por lo tanto es recomendable realizar a análisis de RAMAN e infrarrojo para su total identificación.
- Realizar prueba de permeabilidad tanto en pruebas de laboratorio como “in situ” en las laderas donde afloran los perfiles de meteorización y emplear los resultados en la evaluación hidrogeológica e hidrológica para ambos perfiles de meteorización y así contribuir a las implicaciones Hidrogeológicas que tiene el presente estudio.
- Realizar un análisis de estructural de las fracturas y diaclasas que se evidenciaron en ambos perfiles de meteorización.
- Buscar en la parte superior de los escarpes presentes en la Zona, la corteza de Hierro o relictos de ella, para completar los perfiles de meteorización de cada Litología.

- Cartografiar los diferentes intervalos de meteorización y realizar un corte geológico de estos ya que se comportan como capas diferenciables dentro de la zona de estudio, para determinar su distribución y espesores.

BIBLIOGRAFÍA

- American Petroleum Institute – API. Recommended practices for core analysis. Segunda edición, Febrero (1998). (API RP 40).
- American Society for testing materials – ASTM. Standard specification for wire –cloth sieves for testing purposes. Filadelfia. (1970). (ASTM E-11-70).
- Ardila, M., y Arenas, F. (2010). Metodología para el análisis e interpretación de resultados de laboratorio de análisis petrofísicos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander.
- Ariatizabal, E., Barry, R., y Shuichiro, Y. (2009); Patrones e Índices de Meteorización Química de los depósitos de vertiente y rocas fuente en el Valle de Aburrá. Boletín de Ciencias de la Tierra N° 25, pp. 27-47.
- Aristizábal, E., Valencia, Y., Guerra, A., Vélez, M., y Echeverri, O. (2011). Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. Boletín de Ciencias de la Tierra N°30, pp. 47-60.
- Borrelli, L., Perri, F., Critelli, S., y Gulla, G. (2012). Minero – petrographical features of weathering profiles in Calabria, southern Italy. Catena. Vol. 92. 196-207 pp.
- Borrelli, L., Perri, F., Critelli, S., y Gulla, G. (2013). Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). Catena. Vol.113. 325 – 340 pp.
- Caballero, V. (1995). Geología aplicada a la conservación de recursos Hídricos y Suelos – Cuenca del Rio Lato. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander.

- Campbell, C.J. (1965). The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting. Fourth Caribbean Geological Conference. Memoir: 247-261. Trinidad.
- Candelo, A., Chaustre, N., Landabur, J., y Osma, P. (2008). Practicas recomendadas para probas arena usada en operaciones empacadoras de rípios. Análisis Petrofísicos. Universidad Industrial de Santander.
- Castellanos, L. y Cetina, M. (2013). Determinación de patrones de fracturamiento y análisis cinemático en inmediaciones del municipio de Charta, Macizo de Santander. Universidad Industrial de Santander.
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB. (2007). Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental Subcuenca del Rio de Oro. Grupo asesor de ordenamiento Ambiental Territorial.
- Cruz, L., y Caballero, V. (2007). Guía de laboratorio de sedimentología para geólogos. Laboratorio N°1: Guía para la descripción de la textura de rocas terrígenas. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Publicaciones UIS. 5, 139 pp.
- Deere, D. y Patton, F. (1971). Slope stability in residual soils. 4th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 87 pp.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Maréchal, J.C., Wyns, R. y Krishnamurthy, N.S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifer controlled by single or multiphase weathering. *Journal of hydrology*, 330: 260-284.

- Domínguez, J. M., Román, A. D., Prieto, F., Acevedo, O., y Serrano, S. (2011). Índices de Alteración y meteorización de los suelos de la Región de Danganthza, municipio de Tepatepec de Francisco I. Madero, Hidalgo. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. Vol 3. Pag. 57-65.
- Duzgoren, N., Aydin, A., y Malpas, J. (2002). Distribution of clay minerals along a weathered pyroclastic profile, Hong Kong. Catena. Vol. 50. pp. 17-41.
- Geological Society Engineering –GSE. (1970). Report: The description of rock masses for engineering purposes. The quarterly journal of engineering geology. Great Britain, Vol. 10. 355-388 pp.
- Gómez, I., Colegial, J., Pulido, M., y Gutiérrez, F. (2011). Proyecto de Investigación: Evaluación del riesgo a la contaminación del recurso hídrico subterráneo en la Cuenca Superior del rio Lebrija. Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH).
- González, J., Rodriguez, J., Tarazona, J., Luna, D., Ríos, C., García, C., Castellanos, O., Bonilla, J., Pinto, J., Henao, J., Mendoza, C. Mejía, E., Cabanzo, R., y Molina, D. Artículo aun no publicado. Caracterización mineralógica, química y espectroscópica de la serpentinita en la cantera de explotación de Córdoba, Quindío. Universidad Industrial de Santander.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica y Geotécnica. Biblioteca Universidad Industrial de Santander. Prentice Hall.
- Grupo de investigación sobre desarrollo Regional y Ordenamiento Territorial –GIDROT. (2011). Santander 2030, Diagnostico Dimensión Biofísico Ambiental territorial de Santander. Universidad Industrial de Santander,

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Concretos: Método de ensayo para el Análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Segunda Actualización. ICONTEC, 2007. (NTC 77)
- Instituto de Investigación e información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS) (2002). Mapa Hidrogeológico del Área Metropolitana de Bucaramanga. Escala 1:50.000. Proyecto Evaluación y Exploración de Aguas Subterráneas.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización - INEN. Tamices de ensayo dimensiones nominales de aberturas. (1986). Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 154).
- Instituto Nacional de Vías – INV. Determinación en laboratorio del contenido de (Humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo – agregada. (I.N.V.E-122).
- International Society for Rock Mechanics – ISRM. (1981). International Congress on Rock Mechanics.
- Johnson, R. & DeGraff, J. (1988). Principles of Engineering Geology. John Wiley & Sons, Inc. 170-174 pp.
- Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de Mesas al SW de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología, n° 1.7-44 pp.
- Julivert, M. (1961). Las estructuras del Valle Medio del Magdalena y su significación. Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología, n°6: 33-52 pp.
- Lozano, J. (2012). Caracterización del perfil de meteorización de las rocas cristalinas en la cuenca superior del río Lato y sus implicaciones

hidrogeológicas, Piedecuesta Santander. Universidad Industrial de Santander.

- Mantilla, L. (2003). Guía de Laboratorios de Petrología Ígnea. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología.
- Moreno, C. (2010). Dimensión Biofísica-Ambiental del departamento de Santander. Convenio secretaria de Planeación de Santander, Universidad Industrial de Santander.
- Munsell. (1994). Soils colors charts. The Munsell notation for color. U.S. Department Agriculture Handbook 18-Soil Survey Manual.
- Nesbitt, H. y Young, G. (1984). Prediction of some weathering patterns of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, pp.
- Nesbitt, H. y Young, G. (1989). Formation and diagenesis of weathering profiles. *J. Geol.* Vol. 97. pp. 129-147.
- Price, J. R. y Velbel, M. A. (2002); Chemical Weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*. Vol. 202. 2003. Pag. 397 – 416.
- Royero, J., y Clavijo, J. (2001). Memoria Explicativa Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander 1:400.000. Ministerio de minas y energía. Instituto de investigación e información Geocientífica, minería ambiental y Nuclear (INGEOMINAS). Pag. 15, 16, 21 y 22.

- Sánchez, M. R. (2009). Hidrogeología de Acuíferos Fracturados: Conceptos Básicos. Michigan Tech University.
- Sanders, L. (1998). A manual of field Hydrogeology. Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander. Prentice Hall. 381 pp.
- Sowers, G. (1954). Soil Problems in the southern Piedmont región. American Society of Civil Engineers, proceedings, Vol. 80. Separte 416.
- Sowers, G. (1963). Engineering properties of residual soils derived from igneous and metamorphic rocks. Panamerican Conference on soils mechanics and Foundations Engineering. Segunda Edición. Brasil. 39-62 pp.
- Spalletti, L. (2007). Meteorización (intemperismo). Catedra de Sedimentología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo: Universidad Nacional de la Plata, 2007.
- Torres, R., García, A., y Molina, J. (2004). Petrología Metamórfica, Asistente de Practicas. Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad de Granada, 45 pp.
- Ulloa, A. y Gomez, S. (2007). Proyecto de Investigación Geologica e Hidrogeologica en la región central del Departamento de Santander. Tomo I: Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el Macizo de Santander.
- Ulloa, A., Coronado, W. Mejia, C., Mora, J., Osorio, L, Quintero, C., Salazar, M., Balaguera, G. y Serrano, S. (2006). Mapa de zonas de interés Hidrogeológico del Macizo de Santander cuenca superior del Rio Lebrija. Escala 1:75.000.

- Universidad Centroamericana Jose Simeon Cañas – UCA. (2001). Análisis de Tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz N° 200 (75 µm) en agregado mineral por lavado. Departamento de Mecánica Estructural. Laboratorio de Materiales de Construcción.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., y Restrepo, H. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico – Mineras. Boletín Geológico. Vol. XXI. N° 1 – 3.
- Ward, D., Goldsmith, R., Restrepo, H. y Gómez, E. (1977). Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico – Mineras (INGEOMINAS).
- Yardley, B. W. D., Mackenzie, W. S., y Gulford, C. (1990). Atlas of Metamorphic rocks and their textures. Longman Scientific & Technical, 120 pp.