

**CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL CON
FINES HIDROGEOLÓGICOS EN EL SECTOR NORORIENTAL DE LA CUENCA
DEL RÍO DE ORO**

**WILDER CORONADO LIZARAZO
CAMILO ALFREDO MEJÍA MORENO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2006**

**CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL CON
FINES HIDROGEOLÓGICOS EN EL SECTOR NORORIENTAL DE LA CUENCA
DEL RÍO DE ORO**

**WILDER CORONADO LIZARAZO
CAMILO ALFREDO MEJÍA MORENO**

**Trabajo de Grado para optar al título de
GEÓLOGO**

**Director
JUAN DIEGO COLEGIAL GUTIERREZ
Geólogo Ph.D**

**Directora
SULLY GOMEZ ISIDRO
Ingeniera Civil Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2006**

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres Luis y Cristina por su apoyo e inagotable paciencia a lo largo de este tiempo, a la Karichirola, a Fabianita y Auriol por su compañía y cariño.....

A Domitila y Martin por sus Oraciones.....GRACIAS

LOS AMO.....

Una dedicatoria especial a mi segundo hogar, por tener siempre un espacio para mis ocurrencias,aventuras y todo aquello que necesite. Gracias Rosy, Lauris, Oscariño y a ti Lilis por ese gran, gran apoyo y amor; eres una personita muy especial.

LOS QUIERO MUCHO.....

Wilder Coronado Lizarazo

**A DIOS quien es todo para mí
A mis padres Vicente y Amparo
A mi hermano Diego
A mi sobrinita María Camila**

Camilo Alfredo Mejía Moreno

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que hicieron parte de esta locura, amigos y compañeros de carrera, en especial al zorro, Duende, Kamizami, Aura, Hernancho.

A la Escuela de Geología y sus profesores, al grupo GPH por la oportunidad de trabajar con ellos, en especial a esa gran jefe la “gordita” Alexandra Ulloa por su guía, paciencia y apoyo

A todos Gracias...

Wilder Coronado Lizarazo

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
1.2 TOPOGRAFIA Y MORFOLOGÍA	3
1.3 VIAS DE ACCESO	5
1.4 CLIMA Y VEGETACIÓN	5
1.5 PRECIPITACIÓN	5
1.6 DRENAJE SUPERFICIAL	5
1.7 OBJETIVOS	7
1.7.1 Objetivo General	7
1.7.2 Objetivos Específicos	7
1.8 METODOLOGÍA DE TRABAJO	8
1.8.1 Etapa 1. Recopilación y Análisis de bibliografía existente del área de estudio	8
1.9 ANTECEDENTES	13
1.9.1 A nivel nacional	14

2. GEOLOGIA	19
2.1 LITOLOGÍAS	19
2.1.1 Neis de Bucaramanga – pCb	19
2.1.2 Formación silgará – pDs	23
2.1.3 Ortoneis – pDo	24
2.1.4 Cuarzomonzonita de la Corcova – JRcl	27
2.1.5 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara – JRcs	28
2.1.6 Formación Girón – Jg	31
2.1.7 Formación Tambor – Kita	31
2.1.8 Formación Rosa Blanca – Kir	34
2.2 DEPÓSITOS RECIENTES	36
2.2.1 Depósitos Aluviales – Qal	37
2.2.2 Depósitos Coluviales – Qd	38
2.2.3 Depósitos Fluvioglaciales – Qd	38
2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	39
2.3.1 Falla Bucaramanga – Santa Marta	39
2.3.2 Falla del Río Lato	41
2.3.3 Falla Río Frío	41
2.3.4 Falla Mensulí	41
2.3.5 Falla Granadillos	42
2.3.6 Falla El Picacho	42
2.3.7 Falla Sevilla	43
2.3.8 Falla Antena Caracol	43
2.3.9 Falla Llano Adentro	43

2.4 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA	44
3. GEOMORFOLOGIA	48
3.1 IMAGEN SATELITAL	50
3.2 GEOFORMAS	54
3.3 FORMAS ESTRUCTURALES	54
3.3.1 Anticlinal	55
3.3.2 Laderas Estructurales	55
3.3.3 Escarpes rocosos	56
3.3.4 Escarpes de falla	57
3.3.5 Facetas triangulares	58
3.4 RELIEVES RESIDUALES	58
3.4.1 Conos de Derrubios	59
3.4.2 Erosión en cárcavas	59
3.5 PROCESOS KARSTICOS	60
3.5.1 Dolinas	61
3.6 PROCESOS GLACIARES	61
3.6.1 Morrenas	61
4. METEORIZACIÓN Y ARCILLAS	63
4.1 METEORIZACIÓN	63
4.1.1 Tipos de Meteorización	63
4.1.2 Etapas del Proceso de Meteorización	64
4.2 METODOLOGIA DE CAMPO	66

4.3 ZONAS DE METEORIZACIÓN	68
4.4 GENERALIDADES Y GRUPOS DE ARCILLAS	75
4.4.1 Filosilicatos bilaminares	78
4.4.2 Filosilicatos trilaminares	80
4.5 MUESTREO Y TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS	83
4.5.1 Descripción	84
4.5.2 Fase Laboratorio	85
4.6 ANÁLISIS DE LOS DIFRACTOGRAMAS	92
4.7 RESULTADOS DE LA SEMICUANTIFICACIÓN DE LOS MINERALES DE ARCILLA	97
5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE DIACLASAS Y ESTRÍAS	99
5.1 DIAGRAMA DE ROSETAS	100
5.2 DIAGRAMA DE POLOS	102
5.3 ANÁLISIS DE DIACLASAS	103
5.4 ANÁLISIS DE ESTRÍAS	111
6. CONCLUSIONES	116
7. RECOMENDACIONES	118
BIBLIOGRAFÍA	119
ANEXOS	

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 1. Afloramiento del Neis de Bucaramanga, vía corregimiento de Sevilla-Estación de servicio Los Molinos.	21
Fotografía 2. Detalle del Neis de Bucaramanga, bandeamiento composicional presencia de bandas melanocráticas y leucocráticas. Vía corregimiento de Sevilla-Estación de servicio Los Molinos.	21
Fotografía 3. Detalle de la foliación presente en el Neis de Bucaramanga. Vereda Faltriqueras, Piedecuesta.	22
Fotografía 4. Panorámica del Cerro La Cumbre donde aflora la Formación Silgara, en la cual se aprecian esquistos micáceos de un color gris plata a tonos naranjas debido a su alteración	24
Fotografía 5. Formación Ortoneis de Berlín, donde se observa un grado de meteorización de bajo-medio, en el sector del Cerro Ventanas.	25
Fotografía 6. Formación de cárcavas en el Ortoneis. Sector Páramo de Berlín	26
Fotografía 7. Afloramiento y detalle de la Cuarzomonzonita de la Corcova. Vereda Santa Rita, Piedecuesta	28
Fotografía 8. Afloramiento de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, altiplano de Berlín.	29
Fotografía 9. Perfil de meteorización de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, altiplano de Berlín	30
Fotografía 10. Afloramiento de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, con presencia de venas de cuarzo con 45 de Azimut que cortan la unidad. Finca Villa Hermosa, Páramo de Berlín.	30
Fotografía 11. Panorámica de la Formación Tambor. Alto El Picacho	32
Fotografía 12. Detalle de concreciones de la Formación Tambor, sector de Llano Adentro.	33

Fotografía 13. Diaclasas abiertas en La Formación Rosa Blanca, Sector Llano Adentro	35
Fotografía 14. Bloques curvados debidos a disolución en calizas de La Formación Rosa Blanca. Sector El Picacho.	35
Fotografía 15. Fósiles (Conchillas de Bivalvos) en calizas de La Formación Rosa Blanca. Sector El Picacho.	36
Fotografía 16. Depósitos heterométricos del Río Jordán. Perfil granodecreciente de base a tope. Páramo de Berlín.	37
Fotografía 17. Deposito coluvial en el sector El Picacho, Finca La Moza	38
Fotografía 18. Depósitos de morrenas distribuidas aleatoriamente en el sector El Alto, vía Berlín-Gramal.	39
Fotografía 19. Silla de falla asociada a la falla Granadillos. Vía Sevilla-Estación de servicio Los Molinos.	42
Fotografía 20. Trazo de la falla Sevilla. Sector El Picacho.	44
Fotografía 21. Panorámica de un anticlinal en el sector el Alto El Picacho	55
Fotografía 22. Ladera estructural de la formación Tambor, Fotografía panorámica del Sector Alto el Picacho.	56
Fotografía 23. Escarpes rocosos de las formaciones Tambor y Rosa Blanca, sector Alto El Picacho.	56
Fotografía 24. Escarpes de falla originados en el Sector Alto El Picacho y Llano Adentro.	57
Fotografía 25. Escarpe de falla, zona Antena de Caracol Radio	57
Fotografía 26. Fotografía de Facetas Triangulares, Vereda Granadillos sector Las Amarillas.	58
Fotografía 27. Cárcavas formadas por el efecto erosivo del agua, Vía Estación Los Molinos-Corregimiento de Sevilla.	59
Fotografía 28. Erosión Antrópica generada por la siembra de cultivos en las partes altas de las laderas	60
Fotografía 29. Formas erosionadas por la acción de agentes climáticos como el	61

viento y el agua

Fotografía 30. Dolinas en calizas de la Formación Rosa Blanca, Sector el Peaje (Alto El Picacho)	62
Fotografía 31. Depósitos de morrenas en el Altiplano del Páramo de Berlín	62
Fotografía 32. Cárcavas formadas por el efecto del agua de escorrentía	70
Fotografía 33. Procesos de disolución que afectan las calizas de la Formación Rosa Blanca	71
Fotografía 34. Roca medianamente meteorizada	72
Fotografía 35. Perfil de meteorización, sector el Manzano.	73
Fotografía 36. Perfil de meteorización, presencia de cárcavas	74
Fotografía 37. Perfil de meteorización en el Neis de Bucaramanga	75
Fotografía 38. Proceso de macerado	87
Fotografía 39. Proceso de tamizado	87
Fotografía 40. Embalado y etiquetado	87
Fotografía 41. Proceso descarbonatización	89
Fotografía 42. Balanza de precisión.	90
Fotografía 43. Centrifugadora	90
Fotografía 44. Preparación de la lámina	91
Fotografía 45. Horno para secado	92

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación general de la zona de estudio (Tomado Encarta 2006)	4
Figura 2. Variación de la precipitación anual en la zona de estudio Modificado de Mendoza, C., y Sandoval, R. 2002.	6
Figura 3. Diagrama de flujo de metodología de trabajo.	12
Figura 4. Modelo digital del Terreno de la cuenca superior del Río de Oro	48
Figura 5. Mapa de pendientes de la zona de estudio	50
Figura 6. Imagen de satélite con lineamientos Regionales	52
Figura 7. Tipos de drenajes presentes en la zona, tipo dendrítico y paralelo	53
Figura 8. Etapas y procesos de formación del suelo.	65
Figura 9. (a) Detalle del Perfil; (b) Fracción de tamaño de grano (la escasez de cohesión primaria hace posible un estudio granulométrico desde la base del perfil); (c) Porcentajes de mineral arcilla.	67
Figura 10. Mapa de meteorización de la cuenca del Río de Oro.	69
Figura 11. Estructura interna de los filosilicatos formando tetraedros y octaedros.	76
Figura 12. Una lámina T-O.	78
Figura 13. Estructura elemental de la Caolinita.	79
Figura 14. Una lámina T-O-T.	80
Figura 15. Estructura elemental de la Montmorillonita, illita y caolinita.	81
Figura 16. Estructura interna del grupo de las cloritas	83
Figura 17. Metodología para el análisis de arcillas	88
Figura 18. Difractogramas previos al análisis	94
Figura 19. Difractogramas interpretados, identificación de minerales arcillas	95

Figura 20. Formato para la cuantificación de los minerales arcillosos.	96
Figura 21. Ilustración de un diagrama de Roseta	101
Figura 22. Representación de un polo	102
Figura 23. Diagrama de Rosetas, Sector Páramo de Berlín	103
Figura 24. Diagrama de polos, Zona Páramo de Berlín	104
Figura 25. Diagrama de Contornos, Zona Páramo de Berlín	104
Figura 26. Diagrama de Rosetas, Zona Alto El Picacho	105
Figura 27. Diagrama de Polos, Zona Alto El Picacho	106
Figura 28. Diagrama de Contornos, Zona Alto El picacho	106
Figura 29. Diagrama de Rosetas, Zona Sevilla Piedecuesta	107
Figura 30. Diagrama de polos, Zona Sevilla-Piedecuesta	108
Figura 31. Diagrama de Contornos, Zona Sevilla-Piedecuesta	108
Figura 32. Diagrama de Rosetas, Cuenca total del Río de Oro	109
Figura 33. Diagrama de Polos. Cuenca total del Río de Oro	110
Figura 34. Diagrama de Contornos. Cuenca Total del Río de Oro	110
Figura 35. Graficas originadas para la zona de Páramo de Berlín. a) Diagrama de Esfuerzo – Método del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos	111
Figura 36. Graficas originadas para la zona de Alto El Picacho. a) Diagrama de Esfuerzo – Método del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos	112
Figura 37. Graficas originadas para la zona de Sevilla-Piedecuesta. a) Diagrama de Esfuerzo – Método del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos	113
Figura 38. Graficas originadas para la zona total Cuenca del Río de Oro. a) Diagrama de Esfuerzo – Método del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos	114

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Subdivisión de la Cuenca Superior del Río Lebrija	7
Tabla 2. Metodología de Trabajo	8
Tabla 3. Clasificación del perfil de meteorización.	10

LISTA DE ANEXOS

(VER CD 2)

- Anexo A. Mapa Geológico.**
- Anexo B. Mapa Estructural.**
- Anexo C. Modelo Digital de Elevaciones**
- Anexo D. Mapa de Pendientes.**
- Anexo E. Mapa de Meteorización.**
- Anexo F. Catálogo de Libreta de Campo.**
- Anexo G. Catálogo de Muestras.**
- Anexo H. Catálogo de Fotografías.**
- Anexo I. Difractogramas.**

RESUMEN

TITULO: “CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL CON FINES HIDROGEOLÓGICOS, EN EL SECTOR NORORIENTAL DE LA CUENCA DEL RÍO DE ORO”. *

Autores: CORONADO LIZARAZO, Wilder, MEJÍA MORENO, Camilo Alfredo. **

PALABRAS CLAVES: Río de Oro, Cartografía Geológica, Meteorización, Minerales Arcillosos

DESCRIPCIÓN:

En este proyecto se exponen los aspectos geológicos, estructurales, de meteorización de rocas y análisis de arcillas en la cuenca superior del Río de Oro y parte del Altiplano de Berlín, en los municipios de Tona y Piedecuesta Santander, en un área que comprende aproximadamente 160 Km²; dentro de la cual afloran rocas de tipo metamórfico (Neis de Bucaramanga, Formación Silgará y Ortoneis de Berlín), ígneo (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y de La Corcova) y sedimentario (Formaciones Girón, Tambor y Rosa Blanca), distribuidas en bloques donde en algunos casos estas unidades son cubiertas por depósitos cuaternarios de origen glacial, coluvial y aluvial. La complejidad estructural de la zona esta definida por dos direcciones preferenciales, la primera NE-SW que controla los afluentes del Río de Oro y la segunda NW-SE relacionada con la falla Bucaramanga-Santa Marta.

Las geoformas presentes en la zona de trabajo son las encargadas de modelar el paisaje que se caracteriza por tener cambios abruptos en sus pendientes, desarrollando procesos denudacionales, estructurales, fluviales, cársticos y glaciares, siendo los encargados de generar zonas de filtración y posterior almacenamiento de agua.

La meteorización de la zona también fue caracterizada gracias a una completa recolección de información tomada en campo de los diferentes perfiles de meteorización que presenta la roca, los cuales fueron muestreados y posteriormente descritos. Lo anterior permite generar un mapa de meteorización dentro de la zona de estudio, el cual permite plantear posibles zonas de interés hidrogeológico. Posteriormente se plantea una metodología a seguir en el estudio de los minerales de fracción arcilla derivados de la meteorización de las rocas presentes en el área de estudio.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Geología. COLEGIAL G., Juan Diego y GOMEZ ISIDRO, Sully.

ABSTRACT

TITLE: "GEOLOGIC CARTOGRAPHY AND STRUCTURAL BEHAVIOR WITH HYDROGEOLOGIC PURPOSES, NORTHEASTERN SIDE OF RIO DE ORO BASIN".*

Authors: **CORONADO LIZARAZO, Wilder, MEJÍA MORENO, Camilo Alfredo.** **

Key Words: **Río de Oro, Geologic Cartography, Weathering, Clay Minerals**

DESCRIPTION:

In this report are exposed geologic, structural, weathering profiles and clay mineral studies in the Rio de Oro highest basin and Berlin high plateau, in Tona town and Piedecuesta town, Santander, in an area of 160 Km², in which metamorphic rocks (Neis de Bucaramanga, Formacion Silgará y Ortoneis de Berlin) igneous rocks (Cuarzomonzonita de Santa Barbara y de La Corcova) and sedimentary rocks (Formaciones Girón, Tambor y Rosa Blanca) crop out, all distribute into blocks sometimes covered by quaternary deposits which have different origin, glacial, coluvial and alluvial. Structural complexity is defined by two main directions, first one NE-SW controlling Rio de Oro tributary rivers, and second one NW-SE related with Bucaramanga-Santa Marta major fault.

Geoforms in the study area are responsible of landscape modeling represented by strong slope changes, developing denude, structural, alluvial, glacial and carstic processes, which generate filtering and storage water zones.

Weathering is also characterized due to complete field information of different rock bodies that were sampled and described. In that form a weathering map can be generated in the study area, it can help in defining hydrogeologic zones.

Subsequently a methodology is proposed for studying clay minerals present in different weathering profiles of rock bodies in the study area.

* Graduation Work.

** Faculty of Physico Chemical Engineering. Geology School. COLEGIAL G., Juan Diego, GÓMEZ ISIDRO, Sully.

INTRODUCCIÓN

El estudio cartográfico-geológico que aquí se presenta, se desarrolló en el marco del proyecto de investigación titulado **“INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA EN LA REGIÓN CENTRAL DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER”**. Este proyecto de investigación se realizó gracias a un convenio de cooperación científica suscrito entre la Universidad Industrial de Santander (UIS) y el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), y motivado por la necesidad de evaluar el potencial del recurso hídrico del subsuelo colombiano en cumplimiento de sus funciones como entidad del Estado y con la generación de conocimiento que aporte a la satisfacción de necesidades de la sociedad en cuanto a agua potable se refiere.

La necesidad de mejorar el conocimiento de los factores que afectan el abastecimiento de agua para el desarrollo de la comunidad, en nuestro caso el área metropolitana de Bucaramanga, hace necesario estudiar y entender las fuentes de este recurso y tener nuevos abastecimientos para la ciudad; conocer los procesos asociados a la geología e hidrología constituye uno de los objetivos para realizar un manejo integrado del recurso hídrico para la conservación, renovación y recuperación de la oferta hídrica en la zona.

En este proceso se requiere definir parámetros entre los cuales se encuentran variables geológicas, ya sean litológicas, geotécnicas, geomorfológicas, hidrogeológicas y estructurales. Siendo la Cuenca del Río Oro y el Altiplano de Berlín áreas fuentes en la búsqueda de recursos hídricos, se realizó una validación de la cartografía geológica existente, enfatizando en la complejidad estructural del área, además se realizaron muestreos de arcillas y análisis estadísticos de diaclasas, para conocer las direcciones preferenciales de las fracturas, para generar la base de un futuro modelo hidrogeológico conceptual.

Para un mejor entendimiento del documento a continuación describimos su estructura e idea de los aspectos fundamentales que lo componen. En el capítulo uno se encuentran las generalidades del área de estudio, el capítulo dos describe las diferentes unidades litológicas y el comportamiento estructural de la zona, el capítulo tres describe las geoformas identificadas, el capítulo cuatro describe el

análisis estadístico de diaclasas registradas en campo y el capítulo cinco el análisis del fenómeno de meteorización.

1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio se encuentra localizada geográficamente en el departamento de Santander (Colombia), zona occidental del Macizo de Santander en la Cordillera Oriental Colombiana. Políticamente el área se encuentra conformada por los municipios de Piedecuesta y Tona.

La zona está comprendida entre las coordenadas planas:

$$X_1 = 1287000 \quad Y_1 = 1132000$$

$$X_2 = 1287000 \quad Y_2 = 1130000$$

$$X_3 = 1280000 \quad Y_3 = 1122000$$

$$X_4 = 1277000 \quad Y_4 = 1127000$$

$$X_5 = 1262000 \quad Y_5 = 1116000$$

$$X_6 = 1267000 \quad Y_6 = 1130000$$

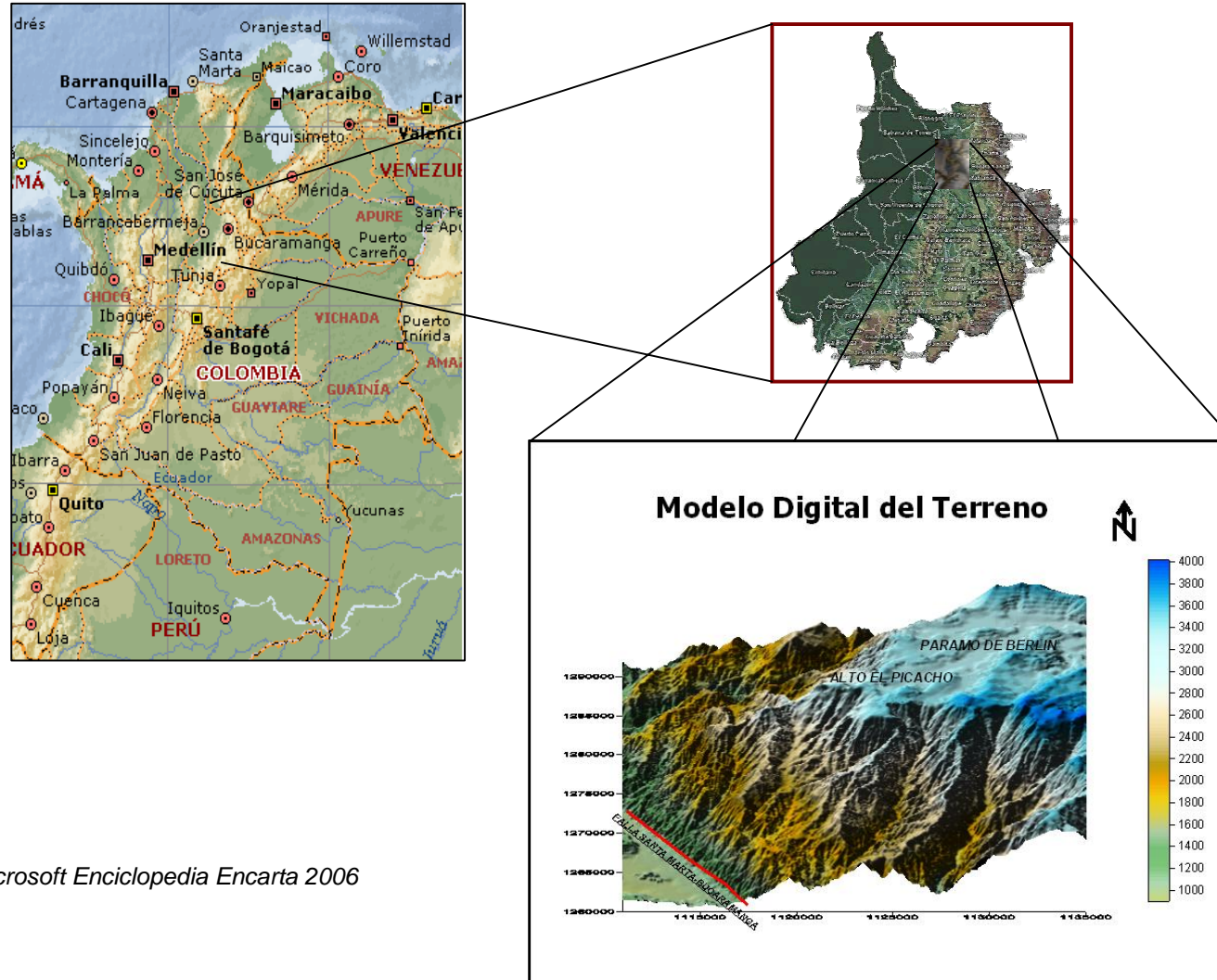
Adoptadas del sistema de coordenadas para Colombia (Esferoide Internacional 1904, proyección conforme de Gauss) con origen de coordenadas $X=1000000$ $Y=1000000$, del Observatorio Astronómico de Santa Fe de Bogotá. Las poblaciones más importantes presentes en la zona de trabajo son los corregimientos de Berlín y Sevilla, pertenecientes a los municipios de Tona y Piedecuesta respectivamente.

En la nomenclatura del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), dicha zona está ubicada dentro de las planchas topográficas 120-II-B, 120-II-D, 110-III-C, 121-I-A y 121-I-C, con un cubrimiento aproximado de 160 Km^2 . (Ver Figura 1)

1.2 TOPOGRAFÍA Y MORFOLOGÍA.

En general el área presenta un rango de elevaciones que oscila entre 900 y 3600 m.s.n.m., representados por pendientes suaves y moderadas hacia la zona del Páramo de Berlín, y por pendientes que varían de moderadas a fuertes hacia los sectores del Alto El Picacho y el corregimiento de Sevilla.

Figura 1. Ubicación general de la zona de estudio



Fuente: Microsoft Enciclopedia Encarta 2006

1.3 VÍAS DE ACCESO.

Las vías de acceso a la zona de estudio son: las carreteras principales Bucaramanga-Pamplona y Floridablanca-Piedecuesta; vías secundarias como Piedecuesta-Sevilla-Km. 40 y Berlín-Tona; y algunas vías que se desprenden de estas y que permiten la entrada a las diferentes veredas de la región.

1.4 CLIMA Y VEGETACIÓN.

El clima de la zona está definido por la orografía, la cual está caracterizada por ser montañosa y variable, creando diversos microclimas, presentando variaciones en la temperatura en función de la altitud sobre el nivel del mar, que van desde $-0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $-0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de aumento en altura (CORPLAN, 2000, Situación Actual y Futuro Inmediato del Área Metropolitana de Bucaramanga).

La zona se encuentra entre los 900 y los 3.600 m.s.n.m., posee temperaturas medias entre los 6 y los 22°C y precipitaciones entre 867–2600 mm, con épocas de veranos cortos a principios y mediados del año, predominan los climas cálidos, fríos y muy fríos. Con respecto a la vegetación en el área de estudio se encuentra zonas de Bosque húmedo premontano, Bosque húmedo montano bajo y Páramo subandino.

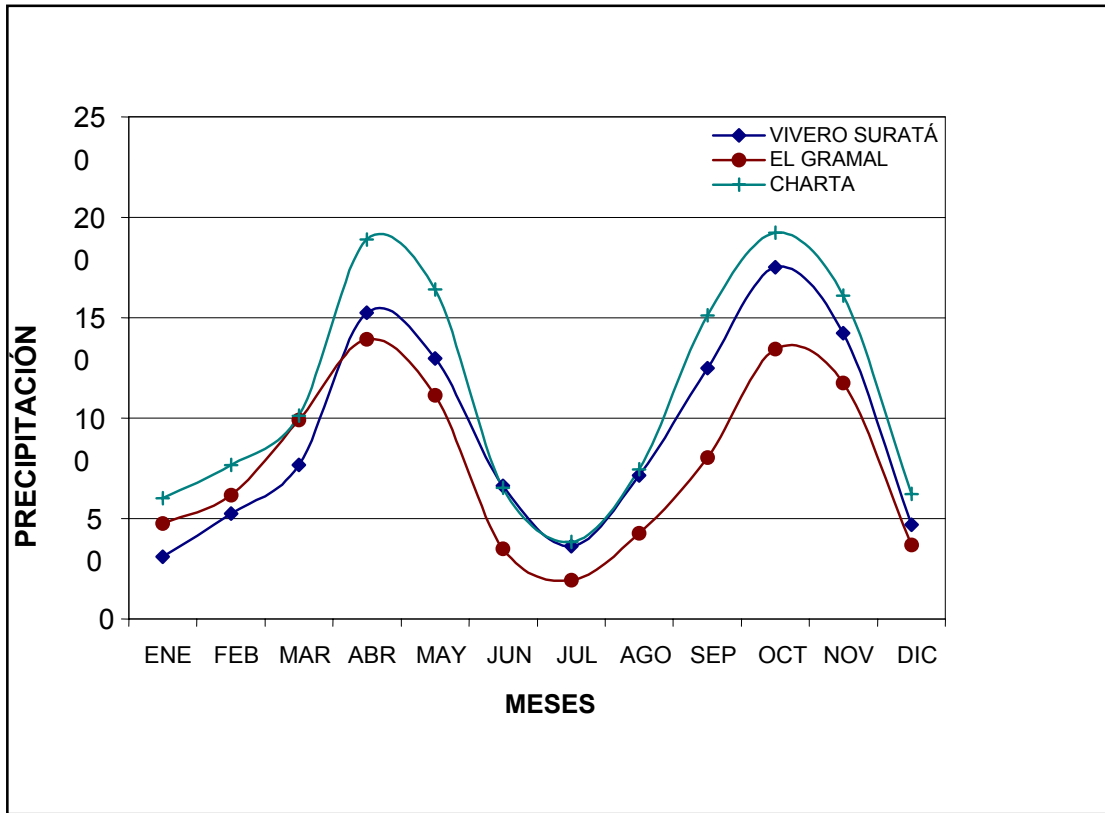
1.5 PRECIPITACIÓN.

Dentro del área de estudio, se presentan dos estaciones lluviosas con períodos secos intercalados. El primero de ellos se inicia a finales de diciembre y finaliza en marzo, mientras que el segundo se inicia a finales de junio y finaliza a mediados de septiembre.

1.6 DRENAJE SUPERFICIAL.

La zona de estudio corresponde a la parte Nororiental de la Cuenca Superior del Río Lebrija, de la cual, hacen parte tres subcuencas (Río de Oro, Río Frío y Río Tona), correspondientes a las áreas de captación y drenaje natural de sus corrientes principales (0). La red hidrográfica de esta cuenca, en su mayoría presenta control estructural.

Figura 2. Variación de la precipitación anual en la zona de estudio.



Fuente: *Modificado de Mendoza, C., y Sandoval, R. 2002.*

En general, la zona está densamente irrigada por ríos de orden menor como lo son los ríos Hato y Jordan; y quebradas como El Rasgón, Arenales, Sevilla, Cebollal, Pescadero, Colepato, La Moza, Morro Negro, El Hoyo, Faltriguera y Hoyo Chiquito entre otras. Las subcuencas presentes en el área de estudio son:

Tabla 1. Subdivisión de la Cuenca Superior del Río Lebrija

SUBCUENCA	CORRIENTE PRINCIPAL	POBLACIONES ALEDAÑAS
Río de Oro	Unión de los ríos de Oro y del Hato o Lato	Piedecuesta, Girón y Bucaramanga.
Río Frío	Río Frío	Cascos urbanos de los municipios de Girón y Floridablanca.
Río Suratá	Unión de los ríos Suratá, Vetas y Charta	Suratá, Matanza, Charta y Bucaramanga.

Fuente: Modificado de Mendoza, C., y Sandoval, R. 2002

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo General. Realizar la cartografía geológica (Escala 1:25000) y caracterización estructural en el sector nororiental de la cuenca del Río de Oro, Santander, definiéndose este trabajo como herramienta para un posterior modelamiento hidrogeológico integral de la cuenca y como una posible guía para próximos trabajos a realizar en la zona.

1.7.2 Objetivos Específicos.

- Realizar un mapa geológico a escala 1:25.000, mediante el reconocimiento de campo del área de estudio, cuya extensión comprende aproximadamente 160 Km².
- Elaborar una descripción a nivel macroscópico de los diferentes cuerpos de roca presentes en el área de estudio.
- Identificar los diferentes grados de meteorización que se presentan en la zona de estudio y proponer una metodología para la identificación de minerales arcillosos mediante el análisis de Difracción de Rayos-X y un análisis físico de la cuenca.

- Elaborar un mapa estructural a partir de la distribución de fracturas, fallas, diaclasas, estrías, etc.; mediante el análisis del software TectonicsFp que permita definir las principales zonas de fracturas y esfuerzos de la zona.
- Crear una base de datos de fracturas y diaclasas de la subcuenca del Río de Oro.

1.8 METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Tabla 2. Metodología de Trabajo.

ETAPA	OBJETIVO
1. Recopilación y análisis de bibliografía existente del área de estudio.	Obtener información de estudios anteriores en el área.
2. Digitalización de las planchas topográficas escala 1 : 25.000	Producir una copia digital de las planchas con las que vamos a trabajar en el terreno.
3. Campo	Obtener datos estructurales, litológicos, geomorfológicos, etc., a una escala de 1:25000
4. Procesamiento de datos	Organización y tabulación de la información obtenida en campo a partir del software TectonicsFp. Comparación de resultados obtenidos manual y digitalmente de forma que sean consistentes y útiles con el modelo general de la cuenca, plantear modelo sistemático para la recolección de muestras de arcilla para identificar minerales arcillosos en los diferentes perfiles de meteorización.
5. Elaboración informe final.	Presentación del informe final para su evaluación.

1.8.1 Etapa 1. Recopilación y análisis de bibliografía existente del área de estudio. En esta etapa se estudiaron los trabajos de investigación realizados en

esta zona, por parte de la Universidad Industrial de Santander (UIS), La Escuela de Geología, la Corporación Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), INGEOMINAS, la Compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, el Grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH), con el fin de adquirir un conocimiento básico y unas bases teóricas que hicieron el reconocimiento de campo más eficaz.

Etapa 2. Digitalización de planchas. En esta etapa se digitalizaron las planchas topográficas concernientes a la zona de trabajo, que fueron la base para la etapa de campo del proyecto, esto se llevó a cabo gracias al grupo de geomática de la Universidad Industrial de Santander, también se generó un modelo digital de elevaciones que junto con la ayuda de imágenes satelitales de la zona de trabajo contribuyeron a la identificación de las principales estructuras (Fallas, Lineamientos).

Etapa 3. Campo. En esta etapa se realizó la cartografía geológica de la siguiente manera:

- Se realizó un reconocimiento preliminar alrededor de las áreas de interés específico con la asesoría de una comisión de Ingeominas para definir las zonas donde se pudo obtener la mayor cantidad de detalles para trabajar cada uno de los objetivos. Previamente con el trabajo realizado en la revisión de la bibliografía, el modelo digital de elevaciones e imagen satelital y el reconocimiento general con la comisión de Ingeominas, se definieron las rutas que permitieron acceder a las zonas de mayor interés para corroborar la información existente y la recopilación de nuevos datos necesarios para la realización del presente trabajo. Este trabajo implicó toma de datos generales litológicos, geomorfológicos y fotografías de afloramientos, panorámicas y estructuras donde se efectuaron las observaciones y la representación sobre el mapa de estos puntos o afloramientos, así como la toma de muestras de mano (teniendo en cuenta el grado de meteorización de la roca) y de otros datos geológicos realizando un mapa preliminar a escala 1:25000.
- Dentro de las observaciones de campo se tuvo en cuenta las siguientes estructuras:

1. Discordancias

2. Estrías
3. Pliegues
4. Fallas
5. Diaclasas
6. Folioaciones
7. Análisis de meteorización de las rocas aflorantes

Tabla 3. Clasificación del perfil de meteorización.

GRADO	DESCRIPCIÓN	Detalles de diagnostico en las muestras
VI	Suelo	No aparece textura reconocible de la Roca. Las capas superficiales pueden contener materia orgánica y raíces
V	Completamente descompuesta	Roca completamente descompuesta pero aun aparece textura de roca ligeramente reconocible
IV	Muy descompuesta	Pedazos grandes que pueden ser destruidos con las manos.
III	Moderadamente descompuesta	Pedazos grandes que no pueden ser descompuestos por las manos (muestras tomadas con broca a rotación)
II	Algo descompuesta	Aparece como roca sana pero tiene manchas muestras de descomposición
I	Roca sana	

Fuente: Tomado de: SUÁREZ DÍAZ J; 2002

Etapas 4. Trabajo de oficina

- El análisis estadístico de diaclasamiento se realizó mediante la utilización de un software estadístico.
- El análisis macroscópico de las muestras que se recolectaron en campo con una respectiva descripción.
- Para clasificación de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas se utilizaron las metodologías propuestas por: Cruz Guevara, L, E. Caballero, V. M. Guía para la descripción de rocas sedimentarias en el terreno. Sedimentología, Prácticas de laboratorio, Escuela de Geología, UIS, 2002, Guía de laboratorio de petrología Ígnea por Mantilla F. Luís, Escuela de Geología, UIS, 2003, Manual de Laboratorio de petrología metamórfica, García R. Carlos, Escuela de Geología, UIS, 1997, respectivamente.
- Se elaboró un mapa geológico que refleja la información litoestratigráfica y estructural de los datos obtenidos en campo y los que se corroboraron con la bibliografía existente.
- Se creó una base de datos con la información recogida de fracturas, estrías y diaclasas.
- Análisis, procesamiento e interpretación de los datos obtenidos en campo.

Etapas 5. Elaboración del informe final. Con toda la información recopilada en las etapas anteriores se produjo un informe con las conclusiones finales que tendrá que ser llevado a una respectiva evaluación.

En la figura 3 se presenta el método de trabajo seguido, el cual explica en forma general las diferentes etapas realizadas durante el desarrollo de este proyecto.

Figura 3. Diagrama de flujo de metodología de trabajo.



1.9 ANTECEDENTES.

A partir de la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de exploración y explotación del recurso hídrico para suplir las necesidades básicas de la población se han logrado varios estudios para definir diferentes tipos de modelos hidrogeológicos, entre estos, modelos conceptuales que tienen como base fundamental la cartografía geológica y su respectiva interpretación al igual que los aspectos hidrológicos. Algunos de los trabajos más representativos en este campo realizados a nivel Mundial y en Colombia se comentan a continuación:

El estudio hidrogeológico de los medios cristalinos fracturados, esta poco desarrollado a nivel mundial, y en efecto, tanto los principios básicos que rigen el movimiento del agua subterránea, como los parámetros hidráulicos que caracterizan a los acuíferos (trasmisividad, permeabilidad, almacenamiento), los balances hídricos y el comportamiento hidroquímico, se han referido prioritariamente a los medios con porosidad intergranular, dejando prácticamente en el olvido la caracterización y evaluación de los medios con porosidad por fractura. El déficit en este aspecto ha sido tan notorio, que aún en la actualidad se emplean los conceptos de los primeros, adaptándolos a los medios discontinuos.

En Perú, Apaza, D. et al., (1998), realizaron un estudio de explotación de acuíferos en rocas fisuradas del Valle Cuzco, mediante galerías filtrantes, para abastecimiento poblacional.

En países latinoamericanos como México, se han realizado estudios relacionados con dirección de flujo y clasificación del agua subterránea, en Monte Alegre, Sierra del Ajusco, con el fin de investigar el movimiento del agua subterránea en zonas montañosas al sur del Distrito Federal (Morales, L. et al., 2000).

En Bolivia se han realizado estudios sobre Caracterización Hidrogeológica en medios discontinuos, con el fin de caracterizar la circulación y el almacenamiento de agua subterránea en estos medios, (Centro de Investigaciones en cambios globales; La Paz, Bolivia, 2000).

En países como Estados Unidos, el estudio de aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas ha sido bien desarrollado; autores como Shapiro, A. et al., (1998), han realizado trabajos referentes a "Técnicas para caracterización de flujo de agua subterránea y transporte de contaminantes en rocas fracturadas", e

"Integración de investigaciones multidisciplinarias en la caracterización de rocas fracturadas". Otros autores como Carleton, G. et al, (2001) y Mayer, J., (2001), han realizado trabajos que contribuyen a la caracterización de fracturas horizontales, hidrogeológicamente activas en rocas cristalinas y en temas relacionados con fluctuaciones rápidas de cabezas hidráulicas de acuíferos en este mismo tipo de rocas, que evidencia la conexión entre agua de superficie y agua subterránea en piedemontes, todos ellos tendientes a proveer habilidades para la caracterización de fracturas en acuíferos.

Juan Gil Montes, (2002), en su estudio "Abastecimiento de Aguas Subterráneas en Extremadura España" reporta caudales mínimos de 0.5 litros/segundo y caudales máximos, en la confluencia de varias fracturas, de 5 litros/segundo en rocas graníticas. Las rocas metamórficas en Extremadura se encuentran normalmente muy fracturadas a grande profundidades y las consideran como semipermeables, llegando a producir caudales hasta de 10 litros/segundo. Las rocas filonianas, si están muy fracturadas, pueden actuar como drenajes respecto a las rocas encajantes y producir caudales elevados de uno a cinco litros/segundo.

En Uruguay, Schildknecht y Neumann-Redlin (2002), realizaron un estudio titulado "Exploración y protección de agua subterránea en acuíferos cristalinos fracturados en el Uruguay", utilizando fotografías aéreas, imágenes satelitales, y métodos geofísicos electromagnéticos. Tomado de tesis

1.9.1 A nivel nacional. Durante 1999 se hizo una propuesta de un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la caracterización física de la subcuenca del Río Pamplonita con énfasis en las áreas de Cúcuta y Villa del Rosario por Argemiro Ramírez, como tesis de maestría de la Universidad Industrial de Santander, donde se evaluó dentro de un modelo conceptual los elementos físicos que influyen en la cobertura vegetal, permeabilidad de los suelos, de los sistemas hidrológicos superficiales y de las unidades hidrogeológicas que conforman el comportamiento dinámico del régimen hídrico en la subcuenca del Río Pamplonita.

Otros estudios de los rasgos estructurales en el área, han sido con fines estructurales o geotécnicos. Pinto y Téllez (1999), realizaron un estudio sobre los rasgos neotectónicos asociados al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta en el Departamento de Santander utilizando imágenes de radar y de satélite.

En el año 2001, se realizó una tesis de postgrado de la Universidad Nacional de Colombia, donde se delimitan las zonas hidrogeológicas de Colombia a escala 1:1.200.000 por Nelson Omar Vargas Martínez, a partir de un modelo geológico del subsuelo, siguiendo las normas y estándares fijados por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Se definen 16 cuencas hidrogeológicas que alojan sistemas acuíferos multicasas con condiciones favorables para su explotación las cuales abarcan el 74% de la extensión total del territorio nacional. Los mapas obtenidos se acompañan de cortes hidrogeológicos que le dan tridimensionalidad a las representaciones e ilustran la geometría y potencialidad acuífera de las unidades propuestas.

En el trabajo de Ruth Beltrán y Alexander Rey para su tesis de grado en el año 2002 se estudió la zona de la Falla Bucaramanga-Santa Marta entre los municipios de Bucaramanga y Piedecuesta constituida en su mayoría por rocas metamórficas del Pre-Cámbrico definidas como el Neis de Bucaramanga. Los autores del estudio definieron vías de migración del agua meteórica por medio de redes subterráneas a partir del análisis de importantes elementos estructurales de las rocas, tales como las fallas y las diaclasas. Como principal conclusión y debido a la interconexión que las diaclasas presentan en la zona se catalogó al Neis como un tipo de recarga importante para la zona de abanicos de la Meseta de Bucaramanga.

En el año 2003, Otoniel Vergara en su tesis de grado: "Prospección geológica para aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas del macizo de Santander, sector oriental de Bucaramanga" de la Universidad Industrial de Santander, realizó un trabajo sobre la relación espacial existente entre los elementos estructurales, fallas y diaclasas, mediante la cual probó la existencia de un acuífero facturado en las rocas cristalinas fracturadas y meteorizadas de la faja de Bucaramanga del macizo de Santander.

En el 2003 en un trabajo de asesoría geológica para la exploración de aguas subterráneas en el área metropolitana de Bucaramanga preparado por los geólogos Jorge E Zambrano y Alexander Rey Porras se identificaron unidades hidrogeológicas desde el punto de vista litológico, asociadas a fallas de rumbo que definen el comportamiento de las formaciones acuíferas. Estas formaciones se encuentran determinadas por unidades semipermeables que definen sellos o acuícerres y unidades permeables llamadas acuíferos o acuitardos.

En 2004 se presentó el trabajo de un modelo conceptual del sistema acuífero del bajo Cauca antioqueño, realizado por Teresita Betancur V. Et al, estudio con el cual se logró definir un modelo conceptual de los acuíferos de la región a partir de la evaluación hidrogeológica entre los municipios de Caucaasia y Cáceres en el bajo Cauca antioqueño (Corantioquia, Universidad de Antioquia 2003). La construcción de este primer modelo para esta zona utilizó metodologías de evaluación hidrológicas tradicionales y validadas en todo el mundo, también para el procesamiento de la información se hizo uso de las mejores herramientas geoinformáticas y se desarrollaron módulos de aplicación dentro del software para Sistemas de Información Geográfica, SIG, ArcView.

Oscar Mauricio Isaza en el año 2004, en su trabajo de grado sobre la recarga mensual de la cuenca del río de Oro encontró que el comportamiento de la recarga en la zona es de tipo bimodal, similar al régimen de lluvias y que la magnitud es cercana al 10% de la precipitación media multianual. Mediante este trabajo se estudió la forma en que se desarrollan los procesos hidrogeológicos a partir de la interacción de las diferentes variables hidrológicas como la precipitación, la evapotranspiración y las diferentes componentes de la escorrentía, para estimar valores de recarga de la cuenca. Además se definieron los mayores valores de recarga para el final de los periodos húmedos de la cuenca del río de Oro.

En el año 2004, Oscar David Araujo, en su informe final de Campo III se encarga de caracterizar litológicamente los pozos perforados en el sector de Pan de Azúcar y Albania para establecer un modelo interpretativo hidrogeológico en rocas cristalinas fracturadas del Macizo de Santander en el sector ESE de Bucaramanga, Santander. Bucaramanga, Marzo de 2004.

En el año 2005 en su tesis de grado de la Universidad Industrial de Santander, Alexandra Ulloa Pinilla y Nadia Rojas Parra realizaron un estudio en la subcuenca del río Sucio en el municipio de Tona, Santander. En el aspecto estructural se definieron dos direcciones preferenciales de fracturamiento controladas por los afluentes de la quebrada río Sucio y por las fallas locales respectivamente. Teniendo en cuenta los diferentes aspectos hidrológicos y geológicos observados en campo y analizados durante el estudio las autoras lograron establecer en el área de trabajo siete unidades hidrogeológicas.

En los últimos dos años se han realizados trabajos como: "Modelación de acuíferos para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea", estudio realizado por

EIDENAR- Grupo de Aguas Subterráneas, Universidad Nacional de Colombia, donde se presenta un modelo de simulación hidrogeológica para el acuífero comprendido en la zona plana de los municipios de Tulúa, San Pedro y Buga (Valle del Cauca – Colombia). Inicialmente se partió de un modelo conceptual ajustado a las características y condiciones del acuífero, construido con base en información real tomada de campo. La modelación se realizó mediante la utilización del programa Visual Modflow, el cual utiliza el método de diferencia finita, consiguiendo un buen ajuste en la diferencia entre los niveles piezométricos medidos y calculados, y a su vez un bajo error de calibración. Y el estudio titulado “Un modelo conceptual de recarga en acuíferos de Bucaramanga a partir de rasgos hidrogeológicos y uso de isótopos estables del agua” por la doctora Sully Gómez Isidro, en donde se plantea un primer modelo conceptual de recarga a acuíferos a partir del estudio de los rasgos geológicos estructurales e hidrológicos más importantes.

Una parte importante de la solución a esta situación se basa en conocer la geología tanto de superficie como de subsuelo, el comportamiento de las estructuras, así como los aspectos geomorfológicos, geodinámicos, entre otros, que permitan así la ubicación de posibles zonas de almacenamiento de aguas sub-superficiales.

Con lo anterior se pretende aportar información y datos que sirvan de base y apoyo en la generación de un modelo estructural y geológico (modelo hidrogeológico) de la zona encaminado a darle un adecuado manejo al recurso hídrico de la región, en nuestro caso el área metropolitana de Bucaramanga; “se hace necesario obtener un modelo geológico y una caracterización estructural de las zonas que se prevén como posibles áreas de recarga del recurso hídrico”.

Este proceso requiere definir parámetros entre los cuales se encuentran variables geológicas, ya sean litológicas, geotécnicas, geomorfológicas y estructurales, donde se requiere validar y generar nuevos datos que permitan un conocimiento más amplio de la cartografía geológica existente de la zona de trabajo.

Con base en los estudios anteriores podemos decir que dichos trabajos se han enfocado principalmente en el aspecto estructural y geotécnico, dejando de un lado la identificación de perfiles de meteorización de las unidades y como este influye de una manera directa el comportamiento (infiltración y flujo) el cual es muy importante al momento de definir un modelo hidrogeológico de un área determinada.

Además la mayoría de estos trabajos se han realizado en zonas cercanas al área metropolitana de Bucaramanga, por lo cual el presente estudio permite dar a conocer zonas de recarga buen detalle, aspectos geológicos y estructurales de un area de mayor tamaño que van a influenciar el aspecto hidrogeológico que es el fin principal en el marco del proyecto de investigación titulado **“INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA EN LA REGIÓN CENTRAL DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER”**.

2. GEOLOGÍA

La zona del Macizo de Santander se caracteriza por presentar rocas de tipo ígneo, metamórfico y sedimentario de edades que van desde el Precámbrico hasta el Terciario. Estas unidades de roca se encuentran cubiertas parcialmente por depósitos cuaternarios de origen diverso.

Las descripciones litoestratigráficas originales son tomadas de Ward, Goldsmith, Cruz y Restrepo 1973, con nomenclatura empleada para la Cordillera Oriental y el Valle del Magdalena Medio.

Las rocas metamórficas están agrupadas dentro de las formaciones Neis de Bucaramanga (**pCb**), la Formación Silgará (**pDs**) y el Ortoneis de Berlín (**pDo**). Las rocas ígneas se encuentran distribuidas ampliamente sobre el Macizo de Santander y corresponden a cuerpos ígneos de edad mesozoica (Triásico-Jurásico) que intruyen rocas metamórficas más antiguas (Silgará, Neises) o constituyen el basamento de la cobertura sedimentaria cretácica. Las unidades ígneas se encuentran agrupadas en la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (**JRcs**) y la Cuarzomonzonita de La Corcova (**JRcl**). Las formaciones sedimentarias comprenden rocas mesozoicas de origen continental, Formaciones Girón y Tambor (**Jg y Kita**) y de origen marino, Formación Rosa Blanca (**Kir**) (ver Anexo A).

2.1 LITOLOGÍAS.

2.1.1 Neis de Bucaramanga - pCb. Su nombre fue dado por Ward y Goldsmith, 1973 y consiste en rocas metasedimentarias de alto grado de metamorfismo comprendiendo principalmente neis biotítico y anfibólico y en menor proporción neis cuarzofeldespático y migmatitas. Su distribución abarca la parte media de las microcuencas Oro Alto, Río Frío y Río Lato, siguiendo una dirección N-NW.

Estas rocas poseen un alto grado de metamorfismo y alcanzan las condiciones de facie anfibolita zona de silimanita superior (GARCÍA Y RÍOS, 1999; GARCIA Y CAMPOS, 2000).

Facies anfibolita de baja presión. Paraneises pelíticos, semipelíticos y arenáceos, esquistos cuarzo micáceos y cantidades menores de neises calcáreos, neises horbléndicos, anfíbolitas y mármoles. Procesos metamórficos ocurridos en el Evento Orinoquiense (Nickeriense) y en la Orogenia Caledoniana (Paleozoico Temprano).¹

La meteorización afecta esta unidad y actúa más intensamente sobre las bandas biotíticas, desarrollando en general suelos residuales limoarenosos con espesores que varían gradualmente con respecto a la altitud y su cercanía con los drenajes. Sobre los cauces rocosos de Río Frío, Lato y Oro se presentan afloramientos de roca moderadamente meteorizada, mientras en los interfluvios y laderas altas el espesor de suelo residual puede ser considerable.

El Neis de Bucaramanga puede reflejar un ciclo de Orogenia del Precámbrico alrededor de 940 a 945 millones de años. Una muestra de Neis biotítico tomada en la parte alta de la subcuenca (MN-1399 en Wardt, 1973) fue analizada radiométricamente reflejando una edad de 680 +/- 140 millones de años.

En el área de estudio el Neis de Bucaramanga se encuentra ubicado en la zona SW y presenta una topografía de pendientes moderadas a altas que hacia la zona cercana al municipio de Piedecuesta forman valles en "V", estos rasgos se pueden apreciar sobre la vía Piedecuesta-Sevilla y la vía ICP-Vereda Granadillos. (Fotografía 1)

En general en toda la zona donde aflora el Neis de Bucaramanga se encuentra bastante diaclasado y además muy alterado debido a la meteorización física y mecánica, a la vez presenta bandeamiento composicional característico donde se observan fácilmente bandas melanocráticas (biotíticas principalmente) y leucocráticas (cuarzo feldespáticas). (Fotografía 2)

¹ Tomado de Memoria Explicativa Departamento de Santander, INGEOMINAS 2001

Fotografía 1. Afloramiento del Neis de Bucaramanga, vía corregimiento de Sevilla-Estación de servicio Los Molinos.



Fotografía 2. Detalle del Neis de Bucaramanga, bandeamiento composicional presencia de bandas melanocráticas y leucocráticas. Vía corregimiento de Sevilla-Estación de servicio Los Molinos.



Hacia la zona de contacto con la Cuarzomonzonita de la Corcova, ésta unidad presenta intrusivos que en su mayoría son de carácter cuarzo feldespáticos. Composicionalmente se puede hablar de dos tipos de Neis, uno biotítico y otro cuazofeldespático.

El Neis biotítico se presenta cerca a la zona de la falla de Bucaramanga-Santa Marta y la falla del Río Lato. Éste posee un mayor grado de meteorización debido a que las micas se alteran fácilmente y produce unos perfiles de meteorización de colores rojizos y naranjas que indica un alto contenido de material arcilloso. Composicionalmente posee Cuarzo (25%), Plagioclasa (20%) Biotita (50%) y otros (5%), texturalmente el Neis biotítico se presenta como una roca granolepidoblástica, y de una estructura néisica masiva.

El neis cuarzo feldespático aflora principalmente a la altura de la vía Piedecuesta-Sevilla; y produce un perfil de meteorización de tipo arenoso de color beige donde la alteración de las plagioclasas produce caolinitización. Composicionalmente el Neis cuarzofeldespático posee cuarzo (45%), feldespato (30%), plagioclasa (10%) micas (15%). Texturalmente es lepidogranoblástico y tiene una estructura néisica masiva.

Hacia el sector sur cerca de la zona de influencia del sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta el Neis de Bucaramanga presenta varias estrías de una cinemática variada, lo que corrobora la complejidad estructural de éste sector de la zona de trabajo. Otro aspecto que evidencia el alto control estructural es la diferencia en las direcciones de foliación y los plegamientos a pequeña escala que presenta el Neis en sectores cercanos a las fallas. (Fotografía 3).

Fotografía 3. Detalle de la foliación presente en el Neis de Bucaramanga. Vereda Faltriqueras, Piedecuesta.



El Neis cuarzofeldespático presenta un aspecto favorable para la hidrogeología, por ser una roca altamente meteorizada y fracturada (diaclasamiento) que le confiere cierta porosidad secundaria, lo cual permite un alto grado de filtración del agua. Por su parte el Neis biotítico debido al contenido de arcillas que presenta en sus perfiles de meteorización en el aspecto hidrogeológico podría comportarse como una unidad sello o impermeable a la hora de la filtración del agua.

2.1.2 Formación Silgará - pDs. Corresponde a una secuencia de rocas parametamórficas de grado bajo, de la facie esquistos verdes hasta la facie anfíbolita (RIOS 1999 y GARCIA Y URIBE 2003) y comprende pizarras, filitas, esquistos, metareniscas y metaconglomerados, que afloran en límites con la microcuenca del Río Tona y como relictos altamente denudados al oeste de la Falla de Bucaramanga, al sur de Piedecuesta dentro de la microcuenca Oro Alto.

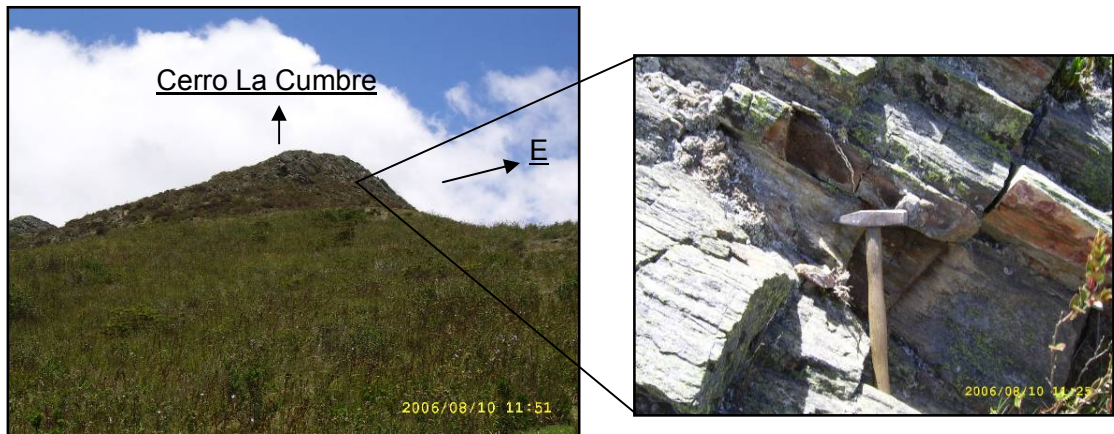
Según lo consignado en el boletín geológico H-12 y H-13 (Ward et al, 1973) la Formación Silgará consta esencialmente de una gruesa sección con intercalaciones de metawaca y esquistos micáceos de grano grueso posiblemente correlacionables con la base de la sección. A la Formación se le ha asignado una edad pre-Devónica. A diferencia de los neises en esta Formación el espesor de los suelos residuales es menor, adicionalmente tiende a presentar coberturas vegetales poco densas (pastizales y rastrojos) que favorecen la erosión laminar por escorrentía.

La Formación Silgará aflora en tres sectores de la cuenca del Río de Oro, en zonas de moderada pendiente.

Hacia el sector de la quebrada El Rasgón, esta unidad se encuentra altamente meteorizada, presentado perfiles de suelo que tienen un color que varía de rojo a naranja, composicionalmente presenta micas (65%), cuarzo (20%) y feldespatos (15%). La textura predominante en los Esquistos de Silgará es la lepidoblástica. La alteración que sufren los minerales debido a la meteorización produce perfiles de suelo con una textura arcillosa, en los cuales se aprecia la estructura esquistosa.

En el sector de la planicie de Berlín, los esquistos de la Formación Silgará afloran en la zona del Alto La Cumbre. Presentan un color gris plateado, con ciertos tonos rojizos debido a la oxidación. Estructuralmente se observan varias familias de diaclasas y algunas estrías. Las rocas presentan la estructura esquistosa característica de esta unidad y la textura lepidoblástica. (Fotografía 4)

Fotografía 4. Panorámica del Cerro La Cumbre donde aflora la Formación Silgara, en la cual se aprecian esquistos micáceos de un color gris plata a tonos naranjas debido a su alteración.



Hacia el sector del Picacho, sobre un camino que conduce hacia la vía a Sevilla, los esquistos son de color naranja, están altamente meteorizados, produciendo un perfil de suelo de textura arcillosa donde se observa la foliación de las rocas.

Al considerarse estas rocas metamórficas su importancia hidrogeológica radica en su porosidad secundaria ligada a las familias de diaclasas principalmente, ya que su meteorización, produce zonas impermeables que impiden el paso de agua debido al desarrollo de minerales arcillosos.

2.1.3 Ortoneis - pDo. Como Ortoneis fue inicialmente definido por Ward, et al. (1973) un cuerpo metamórfico de origen ígneo, con estructura néisica, aspecto masivo y composición félsica a intermedia.

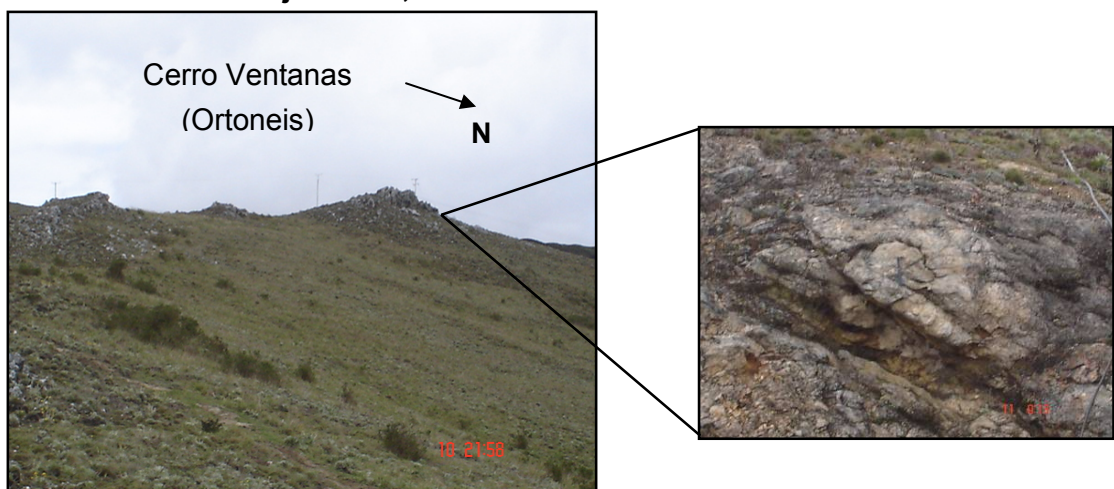
En la memoria explicativa del mapa geológico generalizado del departamento de Santander se propone el nombre de Ortoneis de Berlín (INGEOMINAS 2001) por encontrarse la sección tipo en los alrededores de Berlín, donde tiene su mayor extensión y está mejor expuesto (carretera Bucaramanga-Pamplona). Existen cuerpos menores del Ortoneis de Berlín relacionados con el flanco oriental de los batolitos de Mogotes y Santa Bárbara.

El Ortoneis de Berlín intruye el Complejo Bucaramanga y está cubierto discordantemente por sedimentitas del Devónico medio. Con base en observaciones y relaciones estratigráficas de campo, esta unidad puede abarcar edades del Proterozoico superior al Paleozoico inferior (WARD, et al. 1973). Sin embargo, se conocen algunos registros radiométricos que han arrojado edades mínimas; por ejemplo, la datación Rb/Sr en roca total de un ortoneis en el Río Caraba (Plancha 110, Pamplona) dio una edad de 450 ± 80 m.a., y la datación K/Ar en una metadiorita al Occidente de Ocaña (Plancha 76, Ocaña) que determinó una edad de 413 ± 30 m.a (GOLDSMITH, et al. 1971). Esta unidad corresponde a un neis cuarzofeldespático de composición cuarzomonzonítica a granodiorítica de grano medio. Los análisis petrográficos describen estructuras relícticas de origen ígneo.

Esta unidad se localiza hacia el Páramo de Berlín sobre el costado norte vía que conduce de Bucaramanga a Cúcuta, aflorando hacia el sector del Cerro Ventanas. (Fotografía 5)

Topográficamente la zona corresponde a pendientes que llegan hasta los 3600 metros de altura sobre el nivel del mar. Geomorfológicamente el área presenta lomas redondeadas y cerros de pequeña altura. Sobre esta zona debido al efecto erosivo del agua se forman cárcavas de tamaño considerable.

Fotografía 5. Formación Ortoneis de Berlín, donde se observa un grado de meteorización de bajo-medio, en el sector del Cerro Ventanas.



Composicionalmente el Ortoneis de Berlín contiene cuarzo (30%), feldespatos (35%), micas (20%) y anfíboles (15%), además presenta la estructura néisica característica. El Ortoneis tiene una textura granoblástica. Posee un color que varía entre blanco hueso y gris.

Estructuralmente esta unidad presenta poco diaclasamiento con respecto a las demás formaciones. Con respecto a la meteorización se puede decir que forma unos perfiles de tipo arenoso donde los granos de mayor tamaño corresponden al cuarzo. La roca se disgrega fácilmente.

Hidrogeológicamente esta unidad presenta bajo grado de porosidad por lo cual la infiltración del agua es mínima con respecto a otros sectores de la cuenca. Además se caracteriza por la presencia de cárcavas generadas por el efecto erosivo del agua de escorrentía. (Fotografía 6)

Fotografía 6. Formación de cárcavas en el Ortoneis. Sector Páramo de Berlín.



2.1.4 Cuarzomonzonita de la Corcova - JRcl. Es una roca equigranular de grano fino a medio y de textura sacaroide con biotita uniformemente diseminada de color gris. Se asume una edad semejante con los batolitos principales del Macizo de Santander. La roca está compuesta de 30 a 35% de cuarzo, 25 a 45% de plagioclasa, 30 a 45% de feldespato potásico, un 3% de biotita y trazas hasta de 2% de moscovita (Ward et al, 1973).

Se localiza en la parte media de las microcuencas, Río Frío, Lato y Oro Alto, al suroeste de la Corcova, extendiéndose como una faja alargada de aproximadamente tres kilómetros de ancho con dirección Norte-Sur, intruyendo al Neis de Bucaramanga.

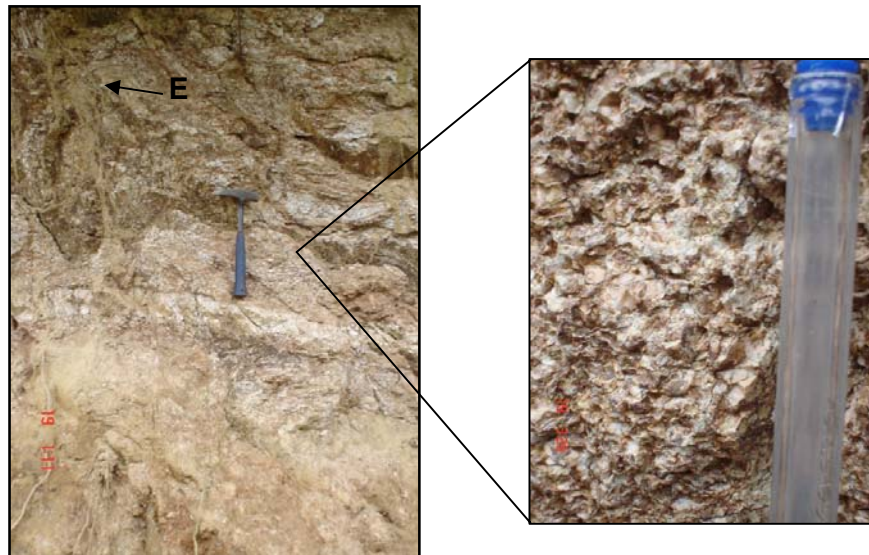
La Cuarzomonzonita de La Corcova aflora en la parte central de la zona de estudio hacia la altura de la vereda de Granadillos perteneciente al municipio de Piedecuesta. La topografía de la zona indica que las pendientes son moderadas en su mayor parte. Las rocas son de color beige y blanco, de composición cuarzofeldespática y se encuentran bastante alteradas por los procesos de meteorización. Dichos procesos ocasionan la Formación de minerales de arcilla (caolines principalmente) por la alteración que sufren las plagioclasas.

Mineralógicamente estas rocas poseen porcentajes promedio cuarzo (35%), plagioclasa (40%), feldespato (20%) y micas (5%), que según diagrama de clasificación de rocas graníticas (Streckeisen, 1976) varían de sienogranito a granodiorita. En su textura las rocas son holocristalinas y faneríticas, y poseen una estructura masiva.

Los perfiles de suelo generados debido a los procesos de meteorización presentan una textura de tipo arenosa. (Fotografía 7)

Estructuralmente dichas rocas presentan diferentes familias de diaclasas; y cerca de la zona de influencia de fallas (Bucaramanga-Santa Marta y Granadillos) se observan estrías de diferente cinemática. También se observan venas de cuarzo a través de toda la unidad. La Cuarzomonzonita de la Corcova presenta propiedades hidrogeológicas favorables para filtración de agua gracias a la presencia notable de diaclasas que le proporcionan una porosidad secundaria lo cual permite el flujo del agua hacia posibles zonas de recarga o acumulación.

Fotografía 7. Afloramiento y detalle de la Cuarzomonzonita de la Corcova. Vereda Santa Rita, Piedecuesta.



2.1.5 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara - JRcs. Roca fanerítica inequigranular de grano grueso a muy grueso, de color rosado naranja a gris violáceo. Con base en análisis petrográficos realizados sobre rocas de esta unidad, presenta una composición de 27% de cuarzo, 25% de feldespato potásico, 40% de plagioclasa y 7% de anfíboles. La anterior distribución puede variar de un lugar a otro, debido a procesos de diferenciación magmática.

Esta unidad se localiza sobre la parte alta de la Microcuenca Oro Alto, en su costado suroriental, sobre la zona límite con el Páramo de Berlín, esta unidad de roca es afectada por meteorización esferoidal y desarrolla suelos residuales arenosos espesos muy susceptibles a la acción de la erosión hídrica.

Ésta unidad se localiza hacia el Páramo de Berlín sobre el costado sur de la vía Bucaramanga-Cúcuta y llega hasta el sector de Arenales. El área presenta una morfología de colinas redondeadas. (Fotografía 8)

La Cuarzomonzonita de Santa Bárbara contiene principalmente cuarzo (35%), plagioclasa (20%) y un alto contenido de feldespato potásico (45%), el cual le

proporciona el color rosa característico de la unidad. Según diagrama de clasificación de rocas graníticas (Streckeisen, 1976) varían de sienogranito a monzogranito.

La Cuarzomonzonita de Santa Bárbara posee una textura de carácter fanerítico, pero hacia el sector del Cerro Tierra Negra aparece una fase porfírica de grano fino, donde los pórfidos corresponden a los cristales de feldespato potásico. Estructuralmente La Cuarzomonzonita de Santa Bárbara es masiva.

Fotografía 8. Afloramiento de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, altiplano de Berlín.



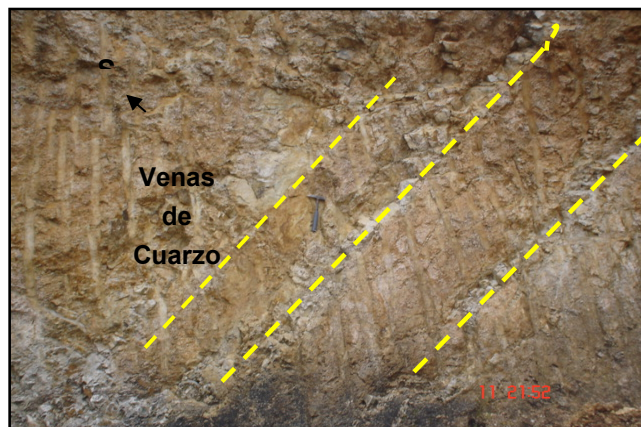
Éstas rocas presentan un alto grado de meteorización donde la plagioclasa es el mineral que presenta en mayor grado la alteración; produciendo la aparición de minerales de arcilla. El perfil de meteorización que se observa es de textura arenosa y de color beige donde se evidencian fácilmente los cristales de cuarzo los cuales son muy resistentes a la alteración. (Fotografía 9)

Estructuralmente la unidad correspondiente a la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara posee poco fracturamiento y sólo en algunos sectores aparecen a lo sumo una familia de diaclasas. En ésta unidad se observa varios diques de cuarzo. (Fotografía 10)

Fotografía 9. Perfil de meteorización de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, altiplano de Berlín.



Fotografía 10. Afloramiento de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, con presencia de venas de cuarzo con 45 de Azimut que cortan la unidad. Finca Villa Hermosa, Páramo de Berlín.



Sus propiedades hidrogeológicas son debidas a su porosidad secundaria a partir del diaclasamiento y su grado de meteorización que forma arenitización, permitiendo la circulación del agua, esto se evidencia en los sectores de Tierra Negra y a lo largo de la vía Berlín-Topón margen izquierda.

2.1.6 Formación Girón – Jg. Inicialmente el término “Girón Series” fue creado por Hettner (1892) para designar una megasecuencia aflorante al occidente de Bucaramanga en los alrededores de Girón, Santander. Se adelantaron varios estudios y entre éstos se destaca el de Trumpy (1943) pero fue Langenheim (1954) quien fijó la sección tipo en la angostura del Río Lebrija y la dividió en tres miembros: uno inferior arenoso (750 m), uno intermedio lodoso (1.250 m) y otro superior arenoso (1.500 m) para un espesor total de 3.500 m.

Entre otros autores que realizaron estudios del Grupo Girón, se incluye a Julivert (1958) y también a Navas (1963), quien midió la sección del Río Lebrija y la subdividió en siete facies con un espesor de 2.690 m. La Formación Girón está compuesta por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm. El espesor de esta unidad varía considerablemente de un sitio a otro, desde unos pocos metros hasta 4.650 m en el Río Lebrija. El ambiente de sedimentación es continental fluvial a lacustre-fluvial. En general La Formación Girón ha sido correlacionada con la Formación La Quinta del Jurásico superior en el occidente de Venezuela (OPPENHEIM, 1940).

La Formación Girón aflora en el sector alto de la Cuenca del Río de Oro, sector Alto El Picacho, sobre la vía que conduce hacia Bucaramanga, esta Formación es descrita y definida por rasgos geomorfológicos y estratigráficos debido a que en la zona no se presentan afloramientos que permitan definir mejor esta unidad. Se diferencia de la Formación Tambor por un paquete de areniscas conglomeráticas violáceas de grano medio a fino, con una matriz arenosa, con granos subredondeados, moderadamente calibrada y mal cementada. La Formación Girón reposa discordantemente sobre la Formación Silgara y La Cuarzomonzonita de Santa Bárbara en este sector.

2.1.7 Formación Tambor - Kita. Según MORALES et al. (1958, p. 643) el nombre fue dado por HEDBERG en 1931 a una sucesión que aflora en el Cañón del Río Lebrija a lo largo del ferrocarril de Bucaramanga a Puerto Wilches, entre los Km. 92 y 93, cerca del caserío de El Tambor. Según MORALES et al.(1958, p. 644-645) el Tambor al S de Zapatoca está formado por shales y conglomerados rojos y

areniscas, que se asemejan al Girón; hacia la parte alta se encuentran algunas capas de caliza. El espesor en la sección tipo es de 650m, aunque regionalmente es muy variable. El Tambor se apoya discordantemente sobre el Girón.

Por encima del Tambor se encuentra la Formación Rosablanca. Esta Formación Tambor en la Mesa de Los Santos y zonas vecinas está constituida por tres niveles: uno inferior, de areniscas, principalmente arcosas de colores frecuentemente rojizos; otro medio, arcilloso con intercalaciones de areniscas, también rojizo o rosado; y otro superior de areniscas blancas, mejor estratificadas que el nivel inferior. El espesor total es de más de 200 m en el borde W de la Mesa de Los Santos y de 120 en el borde E, es decir que adelgaza hacia el Macizo de Santander. Estos tres niveles del Tambor se observan por toda la región desde San Gil hasta el Río Lebrija, área en la que han sido cartografiados por NAVAS (1963).

Las areniscas de la Formación Tambor geográficamente se encuentran ubicadas en el sector del Picacho y Llano Adentro. En el sector El Picacho se aprecia la Formación de laderas estructurales. La Formación Tambor comprende la mayor extensión de las formaciones sedimentarias que afloran en la zona. (Fotografía 11)

Estas rocas tienen un color naranja, se encuentran medianamente meteorizadas, tienen estratificación plano-paralela y tienen un buen grado de fracturamiento.

Fotografía 11. Panorámica de la Formación Tambor. Alto El Picacho.



Texturalmente las areniscas de la Formación Tambor son arenosoportadas con un tamaño de grano de arena fina y son bien calibradas y de aspecto masivo. En términos estratigráficos esta unidad presenta una intercalación de areniscas y shales en su parte superior, hacia el contacto con la Formación Rosa Blanca donde se aprecian concreciones de colores naranjas y violáceos. (Fotografía 12). Hacia el sector de Llano Adentro, presenta un contacto fallado con la Formación Rosa Blanca y Silgará y discordante con la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara.

Fotografía 12. Detalle de concreciones de la Formación Tambor, sector de Llano Adentro.



2.1.8 Formación Rosa Blanca - Kir. Según MORALES et al. (1958) el nombre deriva del Cerro Rosa Blanca, a unos 5 Km. al N del ángulo NE de la Concesión De Mares; el nombre fue dado por WHEELER en un informe inédito. El espesor de esta Formación es de 425 m en el Río Sogamoso, pero es muy variable. La Formación Rosa Blanca ha sido cartografiada por toda la región de Mesas y Cuestas, donde aflora ampliamente (JULIVERT, 1958a, 1958b). Su estratigrafía detallada ha sido estudiada en una sucesión que tiene 318m de potencia situada en el cañón del Río Sogamoso, al W de La Mesa de Los Santos (ZAMARREÑO DE JULIVERT, 1963). El estudio petrográfico de los bancos de dolomías y calizas, ponen de manifiesto que las condiciones de depósito de esta sucesión no fueron constantes.

Así pues puede deducirse que la Formación Rosa Blanca, su edad sería barremiana hacia el N (presencia de *Nicklesia* y *Pulchellia*), hauteriviana hacia la región de la Mesa de Los Santos y San Gil y valanginiana en Villa de Leiva. Esta distribución de edades es sólo una primera aproximación ya que la posición de las faunas dentro de la Formación no se conoce con detalle, pero es suficiente para indicar la oblicuidad antes citada. Esta Formación del Cretáceo Inferior consta principalmente de caliza gris oscura, masiva, fosilífera e intercalaciones menores de lutita gris oscura. Suprayace concordantemente la Formación Tambor, alcanzando espesores hasta de 100 m sobre el Macizo de Santander.

La unidad se ubica en los alrededores del sector del Picacho, sobre una topografía de considerables alturas, formando escarpes en algunas zonas y paisajes cársticos en otras. En la zona de escarpes, las rocas forman capas de espesores que van desde 50 hasta 150 cm. aproximadamente. Las calizas se encuentran altamente fracturadas con presencia de diaclasas que en la mayoría de los casos se encuentran abiertas, favoreciendo de esta manera el flujo de agua a través de estas rocas confiriéndole un alto grado de permeabilidad. (Fotografía 13).

Estas rocas también se presentan en bloques redondeados ó curvados debido al efecto erosivo del agua que causa disolución del carbonato de calcio (CaCO_3), proporcionándole a las rocas una porosidad secundaria. (Fotografía 14)

Fotografía 13. Diaclasas abiertas en La Formación Rosa Blanca, Sector Llano Adentro.



Fotografía 14. Bloques curvados debido a disolución en calizas de La Formación Rosa Blanca. Sector El Picacho.



En estas zonas de disolución es importante la presencia de unas geofomas típicas de los paisajes cársticos llamadas dolinas, las cuales alcanzan diámetros de 5m hasta 80 m, y profundidades que pueden oscilar entre 2m y 20 m. Las calizas son

de tipo micríticas, lodosoportadas presentan recristalización de la calcita y fósiles (conchillas de bivalvos) distribuidos aleatoriamente. (Fotografía 15) En su composición el lodo calcáreo alcanza un 80%, y la calcita recristalizada un 20%.

Fotografía 15. Fósiles (Conchillas de Bivalvos) en calizas de La Formación Rosa Blanca. Sector El Picacho.



En el aspecto hidrogeológico, La Formación Rosa Blanca es muy importante ya que posee una porosidad secundaria excelente ocasionada por el efecto de la disolución del CaCO_3 , que origina que existan diaclasas abiertas que permitan que haya flujo de agua.

2.2 DEPOSITOS RECIENTES

Están representados por depósitos de origen diverso, los cuales no presentan litificación, dando como resultado un comportamiento heterogéneo. Los depósitos reportados en orden de importancia de acuerdo a su extensión en la subcuenca son depósitos aluviales, coluviales y fluvioglaciales.

2.2.1 Depósitos Aluviales - Qal. Estos depósitos son producto de la acción aluvial, de superficie más o menos plana y horizontal, muy poco disectados, ubicados hacia las márgenes de las corrientes de agua principales, este tipo de depósitos se encuentran sobre las llanuras de inundación de los ríos Oro y Jordán (ó Arenales) en el área de estudio.

Cerca al municipio de Berlín se observan unos perfiles de depósitos recientes heterogéneos en su granulometría que va desde arena fina a guijas de formas subredondeadas a subangulares, los cuales presentan una capa de humus de color negro que normalmente tiene un espesor que varía entre los 20 y los 30 cm. (Fotografía 16).

Estos depósitos cuaternarios se observan en zonas de pendientes suaves con colinas redondeadas donde la vegetación es corta, principalmente de pastizales. Por el valle del río Jordán (ó Arenales) sobre el costado norte de la carretera que de Bucaramanga conduce hacia Cúcuta, se presentan geformas de cárcavas desarrolladas por acción del agua.

Fotografía 16. Depósitos heterométricos del Río Jordán. Perfil granodecreciente de base a tope. Páramo de Berlín.



2.2.2 Depósitos coluviales – Qd. Son depósitos acumulados, por lo general, en la base de escarpes, y provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes, por la acción de la fuerza de gravedad. La mayoría se originan por fenómenos de remoción en masa de tipo caída de rocas, deslizamientos y volcamientos. Estos depósitos se encuentran dispersos, relacionados con rocas muy fracturadas. Los principales depósitos de este tipo, se encuentran sobre el pie de ladera de zonas escarpadas como en el Ato del Picacho. (Fotografía 17).

Fotografía 17. Deposito coluvial en el sector El Picacho, Finca La Moza.



2.2.3 Depósitos Fluvioglaciares - Qd. Localizados en la parte alta de la cuenca hacia el páramo de Berlín, diferenciándose los depósitos morrénicos constituidos por material heterométrico de formas angulares a subredondeadas. Hacia el sector de las cabañas de Frailejones en una zona semiplana de colinas suaves se observa depósitos de morrenas. Estas poseen diferentes tamaños y formas alargadas.

Las morrenas también aparecen hacia el sector de Arenales sobre zonas pendiente suave.

Hacia el sector de El Alto se observan morrenas sobre un suelo de color gris claro. Estos depósitos tienen dimensiones que van de 50 a 200 m. (Fotografía 18).

Fotografía 18. Depósitos de morrenas distribuidas aleatoriamente en el sector El Alto, vía Berlín-Gramal.



2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Estructuralmente la zona de estudio se encuentra afectada por el Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta, el cual es producto del ambiente tectónico compresivo regional, resultado del choque entre las placas del Caribe y Suramericana, movimiento que genera desplazamientos rumbo deslizantes en el Noroeste de Suramérica. Este ambiente compresivo ha generado también el Sistema de Fallas de Boconó y el Pilar en Venezuela, Palestina y Otú-Pericos en Colombia.

2.3.1 Falla de Bucaramanga-Santa Marta. La zona de Falla Bucaramanga – Santa Marta se ha cartografiado en una longitud aproximada de 600 Km. desde el extremo sur del Macizo de Santander hasta la costa Caribe, al oeste de Santa Marta; su desplazamiento es horizontal izquierdo, acompañado de grandes desplazamientos verticales (Campbell, C., 1969; Ward, D., et al, 1973 e Irving, E., 1971 en Vásquez, C., 1988). Su tendencia es NW – SE (Pérez, V., 1988).

Campbell, C., (1965) calcula un desplazamiento natural izquierdo según el rumbo de 110 Km., basado en la similitud entre las secuencias Cretácicas y Terciarias de las Cuencas del Magdalena Medio y Cesar.

Julivert, M.,(1961) (En Ward, D., et al, 1973) muestra la Falla de Bucaramanga-Santa Marta como perteneciente a una serie de fallas inversas de ángulo alto, con el bloque oriental levantado, que se formó durante el desarrollo del actual Valle del Magdalena y el levantamiento asociado del Macizo de Santander.

Tschanz et al, 1974 (En Boinet, T., et al, 1989), proponen un desplazamiento de unos 100 Km. con base en la perforación del pozo Algarrobo I (Municipio El Difícil, Departamento del Magdalena), donde existen esquistos metamórficos similares a aquellos de la provincia NW de la Sierra Nevada de Santa Marta, pero situados a unos 100 Km. más al sur.

Stephan, 1982 (En Boinet, T., et al, 1989), propone que el arrastre indicador de un movimiento sinextral de la Falla de Bucaramanga, se observa en el truncamiento de las estructuras del Paleoceno y Eoceno, de la parte Noroeste del Macizo de Santa Marta.

La evidencia geológica indica que la deformación ocurrida en la zona relacionada con la Falla Bucaramanga – Santa Marta es muy reciente, probablemente Mioceno-Plioceno, estrechamente relacionada con el levantamiento de la Cordillera Oriental (Vásquez, C., 1988).

Para Boinet, T., et al. (1989), el máximo desplazamiento de rumbo sinextral de la Falla Bucaramanga – Santa Marta, se sitúa durante el Mioceno – Plioceno.

Neotectónica de la Falla Bucaramanga – Santa Marta. El término Neotectónica, se aplica a toda actividad tectónica que ha ocurrido a partir del Mioceno.

Teniendo en cuenta la influencia directa del Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta en la zona de estudio, se ha relacionado toda actividad neotectónica a este sistema de fallas, cuya caracterización se ha basado principalmente en el análisis morfotectónico de rasgos morfológicos de las unidades pre-cuaternarias, por medio de fotografías aéreas e Imágenes Satelitales.

La Neotectónica de la zona también se puede caracterizar por el alto grado de sismicidad presente, con una magnitud máxima probable de 6.5 en la escala de Richter, quedando catalogada, como un sector con tasa de actividad alta (Pinto, J., y Téllez, G., 1999).

La deformación máxima de este sistema de fallas ha sido considerado del Mioceno-Plioceno por Vásquez, C., (1988) y Boinet, T., (1989) y Plioceno-Pleistoceno por Pinto, J., y Téllez, G., (1999). No se han encontrado evidencias de actividad en el Holoceno.

2.3.2 Falla del Río Lato. Es una falla normal cuya componente de rumbo es dextral, con una longitud aproximada de 20 Km., que se desprende de la Falla de Bucaramanga al noreste de Piedecuesta; sigue el curso del Río Lato en su parte alta y continúa con dirección norte en el curso de Río Frío para unirse con la Falla Río Frío en cercanías al corregimiento de La Corcova.

De sur a norte esta falla atraviesa el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de La Corcova, formando un contacto fallado entre estas dos unidades sobre el cauce de río Frío. (Ver Anexo B).

Esta falla se puede evidenciar en campo gracias a facetas triangulares, lineamiento del Río Lato, contraste litológico y presencia de estrías, la falla tiene una dirección N50E.

2.3.3 Falla Río Frío. Es una estructura normal, de más de 25 Km. de longitud, que se desprende de la falla de Bucaramanga al este del municipio de Floridablanca. Tiene dirección N40E, sigue el curso del río Frío en su parte media hasta los alrededores del corregimiento de La Corcova, donde se une a la falla Río Lato y continúa con dirección N20E hasta la microcuenca del río Charta. Esta falla atraviesa rocas del Neis de Bucaramanga y de la Cuarzomonzonita de La Corcova.

Esta falla se aprecia hacia el SW de la zona de estudio en cercanías de la vereda El Cubin, es una falla de tipo normal con el plano de falla inclinado al E que tiene una componente de rumbo dextral. Esta falla define el contacto entre el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de la Corcova. La falla se reconoce principalmente por el lineamiento del Río Frío (Ver Anexo B).

2.3.4 Falla Mensulí. Esta falla es de tipo normal con plano de falla inclinado hacia el oeste, con una componente de rumbo sinextral, la cual presenta una continuidad

hacia el este, definiéndose de esta forma una segunda falla llamada Granadillos (Ver Anexo B).

2.3.5 Falla Granadillos. Esta falla se define como una falla de rumbo de tipo sinistral. Fue definida gracias a rasgos en la geomorfología como lo son facetas triangulares y la presencia de una silla de falla; también se observaron cambios en las direcciones de foliación de las rocas adyacentes a la zona de influencia de la falla. (Fotografía 19)

La falla se observa hacia la vereda Granadillos sobre el sector de la cancha de fútbol, esta falla corta las unidades del Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de la Corcova (Ver Anexo B).

Fotografía 19. Silla de falla asociada a la falla Granadillos. Vía Sevilla-Estación de servicio Los Molinos.



2.3.6 Falla del Picacho. Falla normal, con un salto vertical de 400 a 500 m con el bloque occidental levantado y una longitud aproximada de 10 Km. Se extiende con dirección noreste de forma paralela a la Falla Sevilla, formando una serie de bloques fallados sobre rocas cretácicas en el sector del Picacho.

Esta falla afecta las rocas sedimentarias del Cretácico en el sector del Picacho, y define el contacto entre la Formación Tambor y la Formación Rosa Blanca. Esta falla se observa con facilidad en el campo ya que su trazo se encuentra bien marcado. También se observan estrías que corroboran el comportamiento de la falla (Ver Anexo B).

2.3.7 Falla de Sevilla. Falla normal con una longitud aproximada de 20 Km. y una dirección N20°E. Se desprende de la Falla de Bucaramanga, en el sector comprendido entre Los Curos y Piedecuesta y sigue el curso de la quebrada Sevilla. Más al norte, sobre la margen izquierda de Río de Oro, se evidencian saltos importantes de hasta 500 m con el bloque oeste levantado, afectando las calizas de la Formación Rosa Blanca y areniscas de la Formación Tambor. La falla se ramifica en el sector del Picacho, terminando cerca de la quebrada Cristalina, afluente del río Tona.

Esta falla en la zona de estudio en los alrededores del Picacho corta la Formación Rosa Blanca. En el sector de la quebrada Colepato define el contacto entre la Formación Silgará y la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Mas hacia el sur en los alrededores del corregimiento de Sevilla la falla define el contacto entre el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de la Corcova.

Esta falla se aprecia especialmente por el contraste litológico, estrías y cambios en las direcciones de foliación en las rocas metamórficas (Ver Anexo B).

2.3.8 Falla Antena Caracol. Falla vertical de tipo normal, con el plano de falla inclinado al W que define el contacto entre la Formación Tambor y el cuerpo ígneo correspondiente a la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Ver Anexo B).

2.3.9 Falla Llano Adentro. Falla de tipo vertical. Afecta las rocas sedimentarias de las Formaciones Tambor y Rosa Blanca. (Ver Anexo B).

Fotografía 20. Trazo de la falla Sevilla. Sector El Picacho.



2.4 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

En la zona del Macizo de Santander se encuentran diferentes unidades geológicas y de diferentes edades así se analizara le evolución tectónica desde las unidades más antiguas hasta los depósitos recientes en la zona.

Las rocas más antiguas del Macizo de Santander son neises biotíticos, cuarzo feldespáticos y horbléndicos; anfibolitas y migmatitas agrupadas en la unidad Neis de Bucaramanga, con metamorfismo regional. Se le ha asignado al Neis de Bucaramanga una edad proterozoica debido a que puede reflejar el ciclo de Orogenia del Precámbrico. (WARD et al. 1973),

A mediados del Proterozoico, el basamento que comprende actualmente al Macizo de Santander se encontraba conectado probablemente al Escudo de Guayana (IRVING, 1971; TSCHANZ, et al., 1974; KROONENBERG, 1982) durante diversas orogenias o bien existía como un basamento alóctono con respecto a dicho escudo (ETAYO, et al., 1983; GONZÁLEZ, et al., 1988; TOUSSAINT y RESTREPO, 1989).

En este tiempo se desarrolla una cuenca marina en la que se depositan sedimentos clásticos con importantes aportes ígneos alcalinos. A finales del Proterozoico (945 -

680 m.a.) esta secuencia es deformada, intruida por cuerpos de composición granodiorítica - cuarzomonzonítica y es sometida a metamorfismo de alto grado como es el caso del Neis de Bucaramanga, alcanzando las condiciones de facie anfibolita zona de silimanita superior (GARCÍA Y RÍOS, 1999; GARCIA Y CAMPOS, 2000). El basamento del precámbrico en el Macizo de Santander, representa el zócalo más antiguo de todo el oriente colombiano, lo que explica las características andinas o intracontinentales de las orogenias que afectaron esta región. Durante el Paleozoico temprano se depositó, sobre paleorrelieves erosionados del Proterozoico, una megasecuencia grano -decreciente cíclica de ambientes de talud submarino (ETAYO, et al., 1983). La Orogenia Caledoniana afectó los depósitos Cambriano-Ordovícicos, produciendo fuertes plegamientos y un metamorfismo de muy bajo a localmente bajo grado, hasta las facies de esquistos verdes y anfibolitas, conformándose la Formación Silgará y la unidad de la secuencia metasedimentaria en el Macizo de Santander, que consiste en, esquistos micáceos, estaurolíticos, granatíferos, anfóbolíticos, calcáreos; cuarcitas moscovíticas y biotíticas; mármoles, filitas. En algunos sectores del Macizo de Santander, las rocas del Neis de Bucaramanga y la Formación Silgara fueron intruidas por el protolito de la Unidad Ortoneis de Berlín, sin embargo, en algunos lugares esta relación no es clara. (GARCÍA Y URIBE, 2003)

Después del hiato estratigráfico en el intervalo Devónico superior-Carbonífero inferior, se sucede el avance de un mar transgresivo (Pensilvaniano-Pérmico). Se inicia una tectónica de fallamiento en respuesta a movimientos epirogénicos que forman relieves de mesas y valles; los avances y retrocesos del mar se suceden en un paisaje árido como lo evidencia la alternancia de sedimentitas rojas y calizas biogénicas. A comienzos del Triásico se inicia la apertura del Paleocaribe por Formación de fosa tectónica de hundimiento (graben), con actividad volcánica más o menos intensa que separa a Norte y Suramérica. El “megaterreno ancestral” comienza a fraccionarse, algunas áreas empiezan a hundirse y en algunas sólo se depositaron algunos abanicos aluviales (TOUSSAINT y RESTREPO, 1989). En las fases finales del Triásico y comienzos del Jurásico, se inicia la ruptura de La Pangea mediante un proceso de Formación de cuenca intercontinental, cuyas ramificaciones afectan gran parte del Cratón Suramericano (se forman aulacógenos, cuencas de tracción), según Maze (1984).

A principios del Jurásico se inicia un proceso de Formación de cuencas en lo que hoy son los valles Medio del Magdalena y del Cesar (ESTRADA, 1972; MACÍA, et al., 1985; MOJICA y HERRERA, 1986; MOJICA y FRANCO, 1990). Este proceso se

inicia en una franja estrecha dando origen a sedimentitas jurásicas, que por esfuerzos distensivos empieza a hundirse en bloques escalonados, provocado por un fallamiento normal, formándose de esta manera el graben primario. En lo referente al actual nororiente colombiano, se forman algunas cuencas (Valle Medio del Magdalena, Cesar, Perijá, Mérida, Maracaibo), que fraccionan la corteza superficial por hundimiento en bloques escalonados siguiendo un patrón en zig-zag, limitado por dos sistemas de falla, uno N-NE y otro NW-SE que lo desplaza, cuyo elemento principal es la Falla de Bucaramanga-Santa Marta. Se suceden breves incursiones marinas (Formación Bocas), seguidas de una sedimentación fluviolacustre, acompañada de un incipiente vulcanismo explosivo (Formación Jordán) que aporta en parte material de relleno de estas cuencas; simultáneamente ocurre la intrusión de cuerpos granodioríticos en el Macizo de Santander (190-160 m.a). Varios batolitos y plutones cuya composición varía de granito a diorita fueron intruidos durante el jura - triásico y ocasionaron desarrollo local de migmatitas. Con este ciclo magmático se relacionan pequeños stocks de porfidos dacíticos-andesítico y diques de basalto, diabasas y dacitas. Cuerpos intrusivos de afinidad calcoalcalina se emplazaron en las unidades metamórficas durante el triásico tardío – jurásico temprano. Sin embargo, algunas dataciones K/Ar y Rb-Sr en batolitos indican una edad paleozoica. Goldsmith et al. 1971; Boinet et al. 1985.

A finales del Jurásico y comienzos del Cretácico se deposita la potente secuencia fluvial del Grupo Girón.

En el Cretácico temprano la sedimentación continental da paso de manera gradual a la transgresión marina, que inicialmente inunda las entradas de las ramificaciones del Paleorift del Magdalena y luego invade áreas mayores (ETAYO, et al., 1989), depositándose una espesa secuencia de areniscas, lutitas y calizas de las formaciones cretácicas en las provincias del Valle Medio del Magdalena, Maracaibo y áreas menores en las provincias de Santander y Mérida. En el Cretácico tardío y comienzos del Terciario, se produce el retiro del mar, acompañado de un levantamiento diferencial. En este tiempo termina la larga etapa distensiva y se produce una inversión de esfuerzos, que desde el Paleoceno da inicio a la etapa compresiva. En el Paleoceno medio ocurre el levantamiento de la provincia del Macizo de Santander. La Cordillera Oriental de Colombia se ha formado en este periodo como consecuencia de la inversión tectónica de cuencas Mesozoicas. Durante esta inversión las antiguas fallas normales, que limitaban las cuencas de rift se reactivaron en compresión frontal u oblicua dependiendo de la posición que ellas guardan con los esfuerzos generados por los movimientos de las placas oceánicas

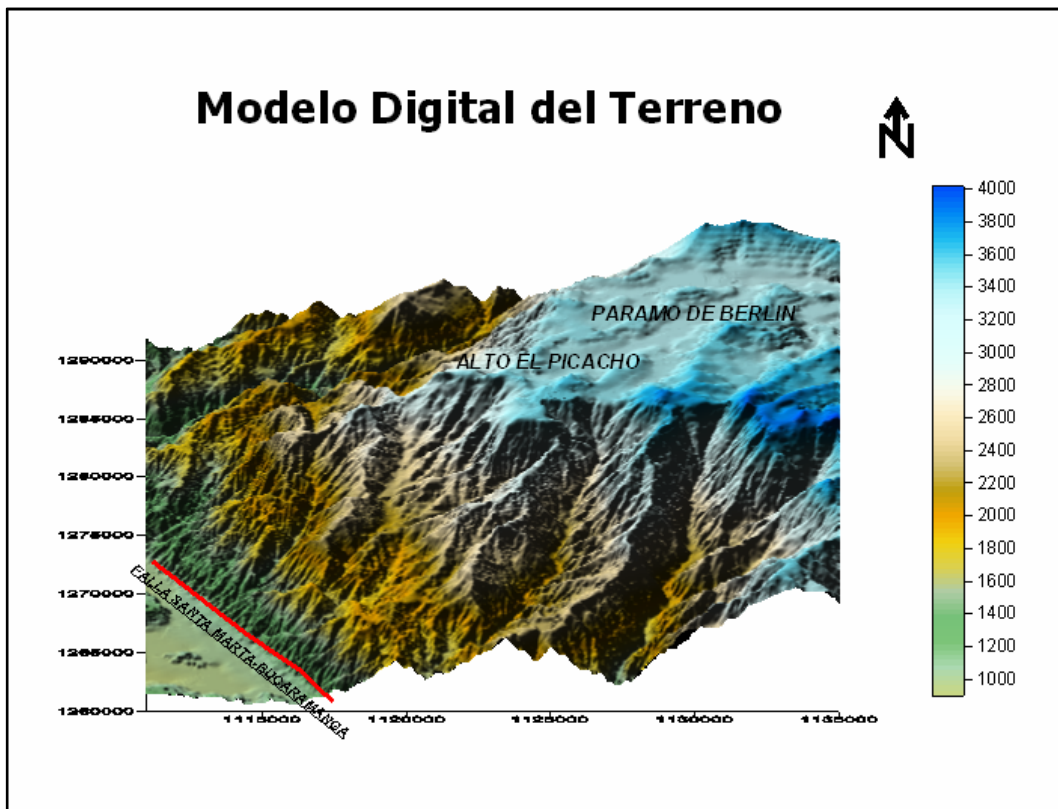
nazca, cocos y caribe con respecto a la placa continental Sudamérica. (Taboada et al. 2000).

Durante este lapso la erosión remueve gran parte de la megasecuencia cretácica, y aporta el material que forma las diversas y potentes unidades terciarias. Durante el Mioceno medio se inicia el levantamiento generalizado de la Cordillera Oriental colombiana. En el Mioceno medio-tardío se produce una fase de compresión más intensa, y se forma en la parte occidental de la Cordillera Oriental, una cadena plegada cabalgante con vergencia al occidente (FABRE, 1983) y un sistema de cabalgamiento con vergencia hacia el oriente en la región oriental (Bloque de Pamplona). Esto hace que el Macizo de Santander se comporte como un horst cuyos flancos oriental y occidental cabalgan sobre el Valle Medio del Magdalena los Llanos Orientales, respectivamente (FABRE, 1983; TOUSSAINT y RESTREPO, 1989; TOUSSAINT, et al., 1992). Durante el Mioceno tardío y el Plioceno, la Falla Bucaramanga-Santa Marta, tuvo su desplazamiento de rumbo sinistral de aproximadamente 100 Km. (BOINET, et al., 1989). La última fase compresiva en la Cordillera Oriental se produce desde el Mioceno tardío y se continúa hasta el presente (BOINET, et al., 1985), generada por el desplazamiento de la placa Suramericana hacia el occidente. En el Mioceno temprano-Plioceno- Pleistoceno se deposita la secuencia molásica del Grupo Real. Entre el Pleistoceno y el Holoceno, se producen grandes depósitos fluviales semiconsolidados y pequeños depósitos glaciares; se destacan los que cubren el Valle Medio del Magdalena y los que constituyen la Meseta de Bucaramanga y el altiplano de Berlín, entre otros.

3. GEOMORFOLOGIA

Etimológicamente, la palabra geomorfología viene de tres raíces griegas; geo (tierra), morphe (forma) y logos (tratado), o sea, es el estudio de las formas de la superficie.

Figura 4. Modelo digital del Terreno de la cuenca superior del Río de Oro.



El modelado del relieve está íntimamente ligado a procesos tanto exógenos como el clima, como endógenos relacionados a las fuerzas internas que afectan la corteza, es decir, es el resultado de una compleja interacción de factores litológicos,

tectónicos y climáticos, enmarcado en una indispensable variable adicional como lo es el tiempo.

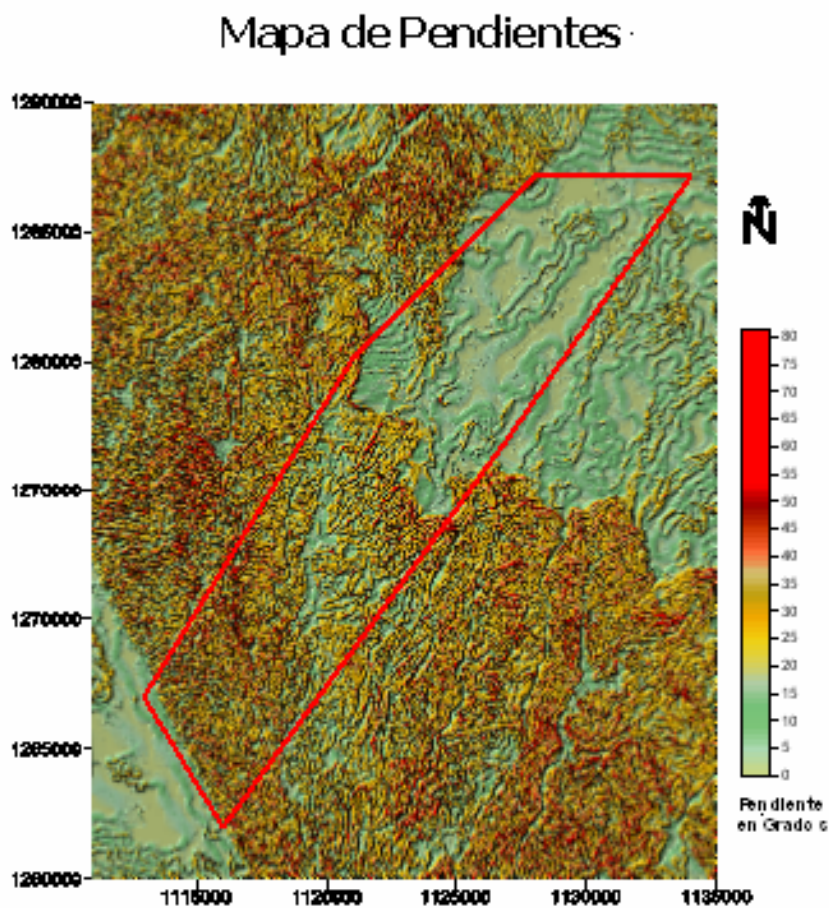
La cuenca del Río de Oro es muy variada en su extensión y geomorfología al igual que el altiplano de Berlín debido a la heterogeneidad en los tipos de roca que allí se encuentran, debido a que cada una de las montañas, colinas, lomas, dependen de la naturaleza del material parental, composición mineralógica, consistencia, estructura, permeabilidad, uniformidad, etc. Para la identificación de formas del relieve terrestre se tuvo en cuenta diferentes niveles de observación discriminando regiones fisiográficas, paisajes, tipo de relieve, estructuras y formas del terreno, uno de estos niveles de observación a tener en cuenta es el grado de pendiente de la zona de trabajo (Ver Figuras 4 y 5, Anexos C y D).

El paisaje de montaña, como ocurre en este caso, constituye un nivel muy amplio de observación y dentro de este, se pueden encontrar paisajes formados por procesos denudacionales donde se incluyen procesos continuados por largo tiempo como procesos de erosión y remoción en masa, paisajes controlados estructuralmente relacionados con diferentes clases de estructuras geológicas las cuales ejercen una influencia dominante, paisajes kársticos y fluviales influenciados por la acción del agua a nivel subterráneo y superficial respectivamente y paisajes glaciares modelados por el movimiento del hielo y su cobertura parcial por depósitos glaciares.

En este trabajo se utilizan como herramientas indispensables las imágenes satelitales, el trabajo de campo y el modelo digital de elevaciones de la zona de estudio para determinar los principales rasgos geomorfológicos que caracterizan esta cuenca de alta montaña enmarcada en su complejidad estructural y su variedad litológica.

La imagen satelital es una imagen LANDSAT TM y el modelo digital de elevaciones es un modelo realizado en el programa SURFER 8 con una base topográfica del IGAC desarrollado por el Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) de la Escuela de Ingeniería Civil (UIS).

Figura 5. Mapa de pendientes de la zona de estudio



3.1 IMAGEN SATELITAL

La teledetección es una técnica aplicada, y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento, dado que en ella se conjugan aspectos muy variados como la óptica y los detectores de un sensor determinado, el vehículo que lo sustenta, sus sistemas de transmisión de los datos que obtiene, los equipos para tratamientos de los mismos, etc. Así las formas de tele-observación han variado ostensiblemente durante la historia

El Landsat mide radiación electromagnética en un total de siete bandas: tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo lejano y una en el infrarrojo termal. La banda 7 es sensible a la morfología del terreno, lo cual le permite tener información sobre geomorfología, suelos y geología, al igual que realizar cartografía hidrotermal en terrenos áridos a semiáridos

Para la interpretación de imágenes satelitales se usaron imágenes tipo Landsat 7 ETM+, también se procesó la cartografía digital de la zona de estudio y se generó un modelo digital del terreno en el software SURFER 8.

Para interpretar las imágenes de satélite y obtener los lineamientos estructurales más representativos del área de la plancha se aplicaron a las imágenes filtros en las direcciones NS, EW, NE y NW. La aplicación de estos filtros permitió resaltar todas las direcciones de lineamientos presentes en el área.

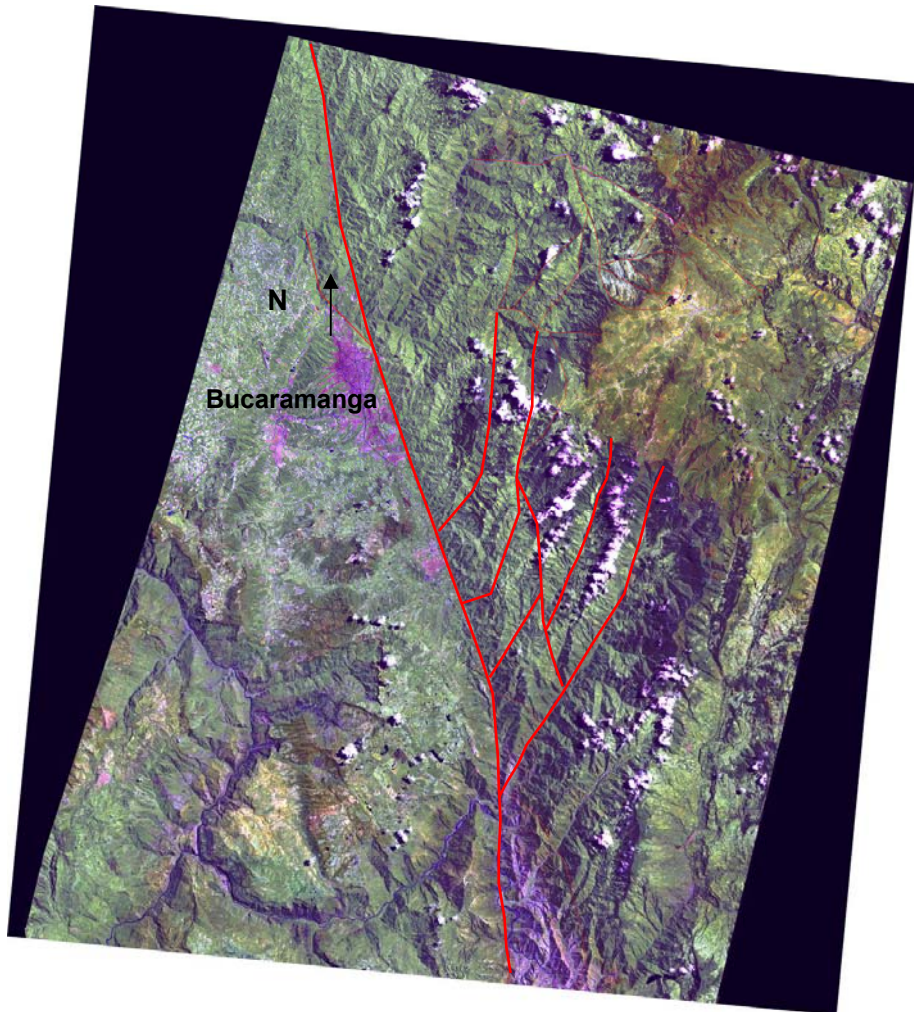
Derivado del modelo digital de elevaciones, el mapa de pendientes, la imagen satelital y de la base topográfica, encontramos que en la zona se cuenta con un drenaje dendrítico-subdendrítico sobre las unidades cristalinas del Macizo de Santander como lo son el Neis de Bucaramanga y La Cuarzomonzonita de la Corcova, al igual que un drenaje paralelo y sub-paralelo en los sectores del Alto el Picacho y el Altiplano de Berlín (Figura 7), sobre las unidades sedimentarias y cristalinas del Páramo de Berlín.

Al igual se lograron identificar algunas estructuras como lineamientos y fallas presentes en la zona de trabajo, debido a lineamientos de las quebradas o ríos y cambios bruscos en la pendiente del terreno; estos rasgos presentan una dirección preferencial NE, los cuales son los más extensos y se encargan de controlar los drenajes de las quebradas la Moza, el Reventón, Santa Rita, Colépató, el Rasgón y el Río de Oro.

Una característica predominante de la zona es su topografía que presenta rasgos bien marcados como lo son zonas de pendientes abruptas, como es el caso de la parte sur-occidental del área de estudio que presenta pendientes de 35-60° aproximadamente, donde estas zonas están caracterizadas por un variado clima que va de un clima húmedo en el Sector de el Rasgón a climas calidos hacia el municipio de Piedecuesta, estas variante al igual que la de la precipitación y el tipo

de roca que aflora, son los encargados del modelamiento actual de paisaje donde el grado de pendiente es muy marcado.

Figura 6. Imagen de satélite con lineamientos Regionales.

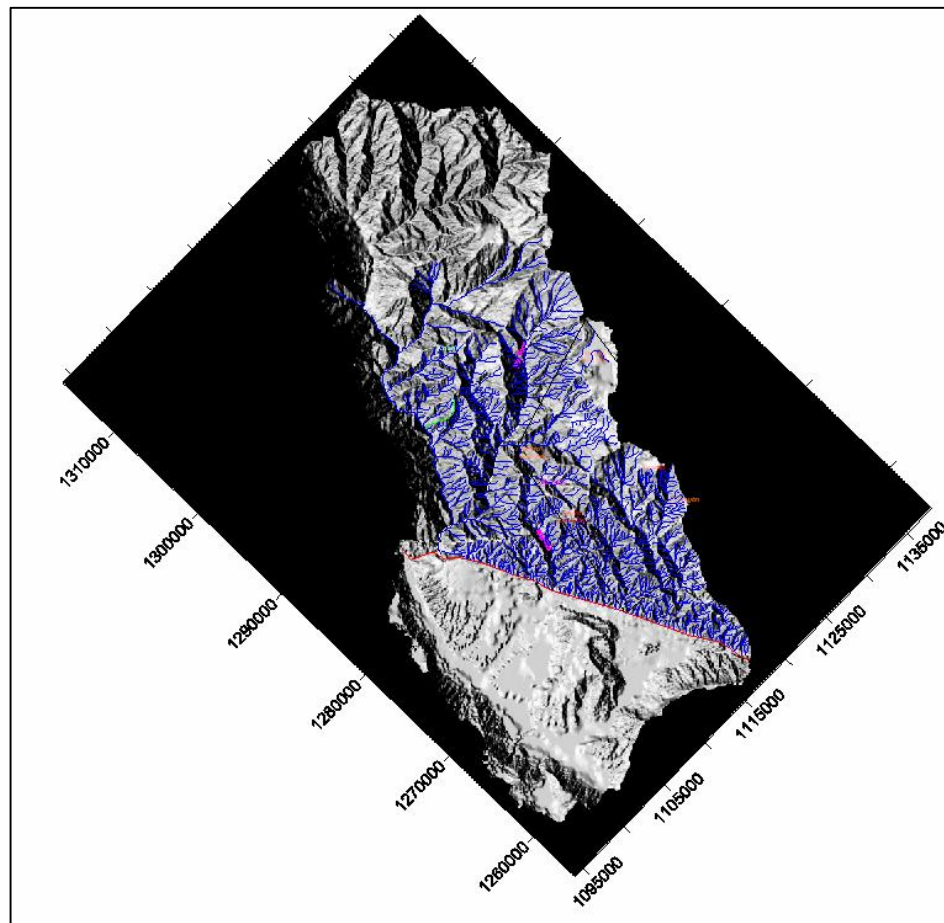


Dentro de la zona podemos encontrar un contraste de pendientes, hacia el sector del Altiplano de Berlín se cuenta con una topografía de pendientes suaves que se caracteriza por lomas, colinas y zonas planas de pendientes de 1-20°

aproximadamente; mientras que para el sector de Sevilla se presentan pendientes de 35-60° caracterizadas por zonas montañosas.

La zona del altiplano de Berlín está caracterizada por un clima seco y de fuertes vientos, con una precipitación media con respecto al sector del Rasgón donde encontramos Bosques Húmedos, este sector presenta grados de meteorización menores que los que se presentan en el sector de El Rasgón y la zona de Falla Bucaramanga-Santa Marta. (Figura 6, mapa de pendientes).

Figura 7. Tipos de drenajes presentes en la zona, tipo dendrítico y paralelo



3.2 GEOFORMAS

El relieve terrestre es, como se ha dicho antes, el resultado de la interacción de diversos factores, de tal forma que la litología y la tectónica determinan las llamadas formas estructurales y estas a su vez constituyen el marco físico en el cual actúan los procesos morfoclimáticos.

La influencia del clima está relacionada con los diferentes procesos que contribuyen al modelado del paisaje, tales como meteorización, pedogénesis y diferentes etapas del proceso morfogenético, como erosión, transporte y acumulación.

Interviene una tercera categoría de fenómenos, llamados procesos azonales, es decir agentes responsables de las formas que modelan las vertientes, cauces de los ríos, etc., tales como el escurrimiento superficial, soliflucción, reptación, que varían en función del clima, litología y el grado de pendiente que presente una zona determinada.

Toda forma del relieve es entonces el resultado de la intervención de los factores mencionados, sin que predomine alguno de ellos.

La expresión del relieve también está influenciada por otros parámetros que no pueden dejar de tenerse en cuenta como son la escala geográfica y las herencias, en particular las del orden climático (paleoclimas).

A escala geográfica, en el caso del Macizo de Santander con grandes unidades, dominan los factores tectónicos. A nivel de las pequeñas dimensiones y para un mismo contexto climático, dominan las influencias litológicas (Villamizar, 1994).

En este capítulo se hará una descripción generalizada de las geoformas identificadas en la fase de campo realizada en la zona de trabajo en el Macizo de Santander.

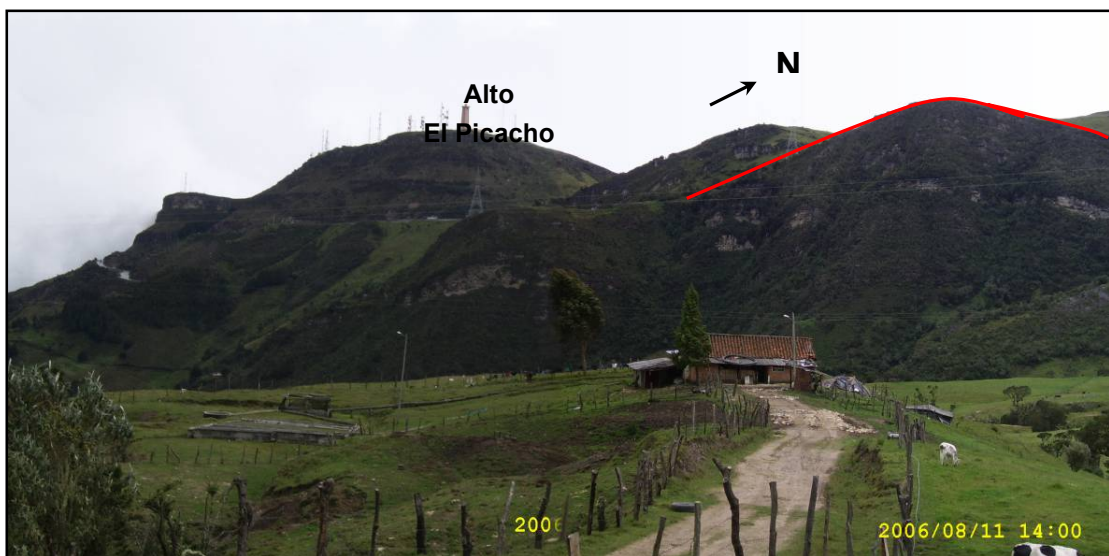
3.3 FORMAS ESTRUCTURALES

En la cuenca del Río Oro y el Altiplano de Berlín se encuentran diversas manifestaciones estructurales que originan diferentes formas del relieve. Son una consecuencia de las deformaciones del material litológico condicionados por la

tectónica y las propiedades mecánicas de las rocas que incluyen las rocas cristalinas del Macizo como su cobertura sedimentaria que la suprayace. Dentro de las formas estructurales se encuentran las siguientes:

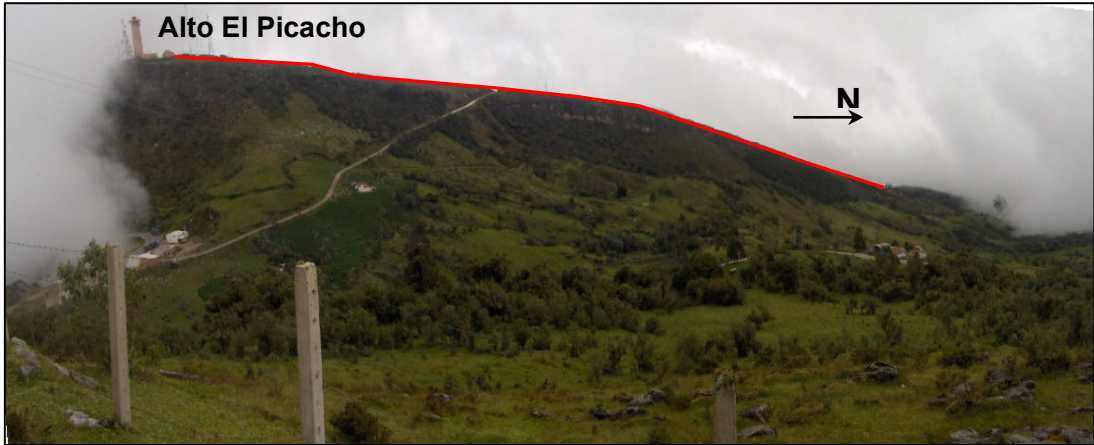
3.3.1 Anticlinal. Es un pliegue debido a la tectónica, en el que la estratificación es cóncava hacia abajo y cuyo núcleo está conformado por rocas estratigráficamente más viejas. Esta expresión geomorfológica se aprecia en el sector del la Antena de Caracol Radio, Alto El Picacho, donde se evidencia un leve pliegue generado por la acción de la falla Picacho a la Formación Tambor (Fotografía 21).

Fotografía 21. Panorámica de un anticlinal en el sector el Alto El picacho



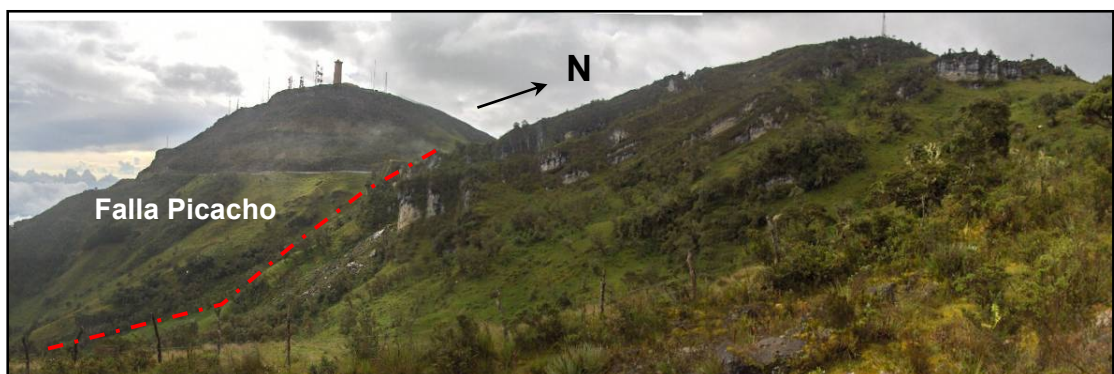
3.3.2 Laderas Estructurales. Corresponden a superficies del terreno que siguen la misma dirección del buzamiento de los estratos. En la zona de trabajo corresponde al sector del Alto El Picacho, donde estas estructuras se encuentran asociadas a la acción de trazos de Falla, corresponden principalmente a las Formaciones Tambor Y Rosa Blanca (Fotografía 22).

Fotografía 22. Ladera estructural de la formación Tambor, Fotografía panorámica del Sector Alto el Picacho.



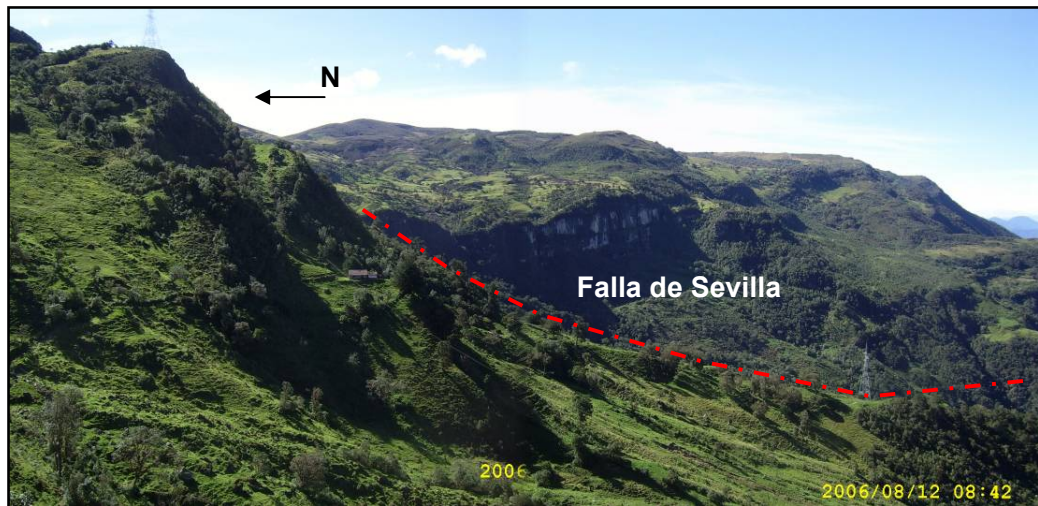
3.3.3 Escarpes rocosos. Corresponden a taludes que exhiben pendientes abruptas, a casi verticales, en los que se aprecia claramente su estratificación. Su origen está relacionado con procesos de levantamiento del macizo y desmantelamiento con ruptura de la cobertura sedimentaria con presencia de fallamiento muy activo regionalmente, las cuales se evidencian en los sectores del Alto El Picacho y Llano Adentro (Fotografía 23).

Fotografía 23. Escarpes rocosos de las formaciones Tambor y Rosa Blanca, sector Alto El Picacho.

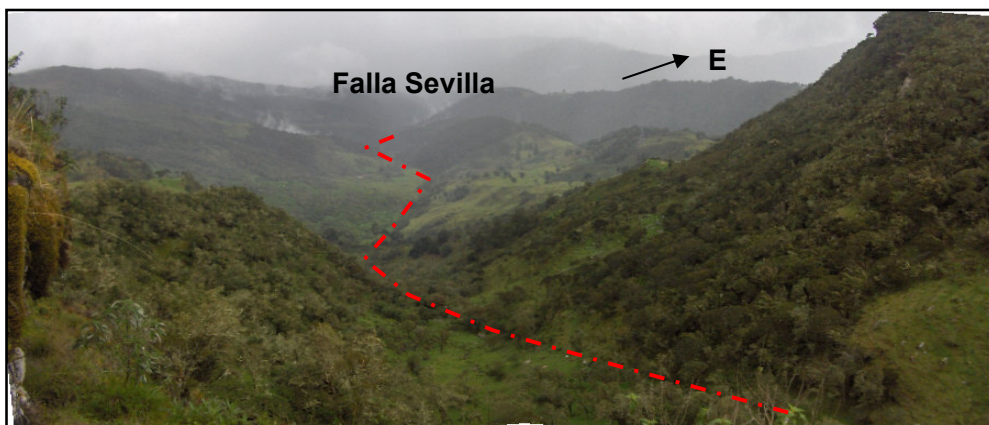


3.3.4 Escarpes de falla. Vertiente de superficie rectilínea asociado con el talud del plano de falla. El contacto entre el material sedimentario y las rocas cristalinas se manifiesta como un valle de línea de falla en V y sus vertientes están afectadas por erosión moderada. El mejor ejemplo lo constituye el correspondiente a la falla La Sevilla y Picacho (Fotografía 24-25)

Fotografía 24. Escarpes de falla originados en el Sector Alto El Picacho y Llano Adentro.

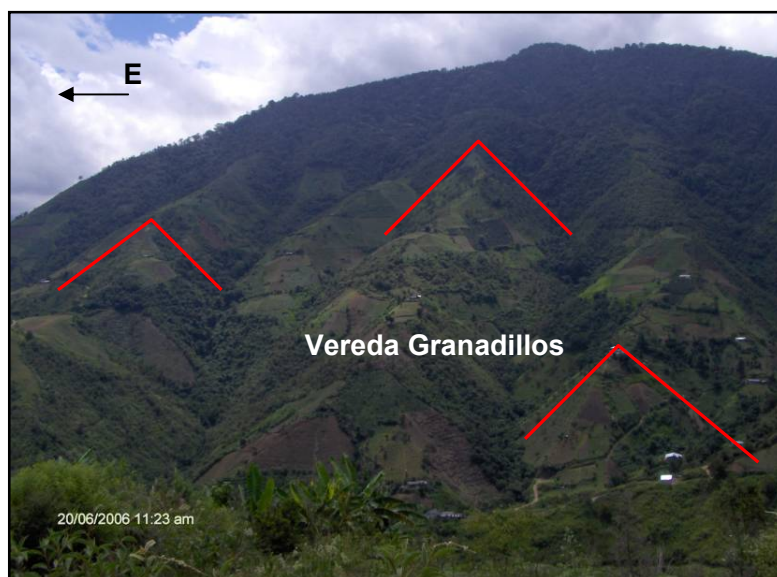


Fotografía 25. Escarpe de falla, zona Antena de Caracol Radio.



3.3.5 Facetas triangulares. Es una forma triangular que se puede desarrollar sobre escarpes de falla así como también a lo largo de escarpes de línea de falla, como los presentes a lo largo de la falla Granadillos (Q. Faltriquera), Vereda Granadillos, sector Las Amarillas (Fotografía 26).

Fotografía 26. Fotografía de Facetas Triangulares, Vereda Granadillos sector Las Amarillas.



3.4 RELIEVES RESIDUALES

Formas debidas a la dinámica de vertientes: Son el resultado de procesos erosivos antiguos y recientes. Interviene la secuencia erosión, transporte y acumulación. Se pueden diferenciar entonces procesos donde interviene la gravedad principalmente y otras como las propiedades del material meteorizado frente a agentes importantes como agua, hielo y finalmente los debidos al escurrimiento superficial.

Formas debidas a procesos gravitacionales. Se tienen las siguientes:

3.4.1 Conos de derrubios. Son depósitos de fragmentos gruesos que se acumulan al pie de las vertientes. La principal causa de su formación es la gravedad, además intervienen el fracturamiento o diaclasamiento de la roca, meteorización y presión de las raíces de las plantas.

Formas debidas al escurrimiento superficial: Están relacionadas con la acción del agua sobre el terreno y de acuerdo con su acción sobre la superficie del relieve se clasifican en laminar, surcos y cárcavas.

3.4.2 Erosión en cárcavas. Es el resultado de la profundización y ampliación de los surcos que forman canales aislados con contornos y bordes bien definidos y con profundidades que varían entre 0.5 m y 5.0 m, estas geoformas se pueden encontrar sobre la vía de la Estación de Los Molinos-Sevilla y en el Altiplano de Berlín sobre las Unidades de Ortoneis Berlín y Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Fotografía 27).

Fotografía 27. Cárcavas formadas por el efecto erosivo del agua, Vía Estación Los Molinos-Corregimiento de Sevilla.



Otra modalidad de erosión que se presenta en la zona hace referencia a la erosión antrópica que se genera directa o indirectamente por la acción del hombre, quien contribuye a acelerar los procesos de degradación del suelo. Comprende las terracetas o patas de vaca, que consisten en arrugas del suelo paralelas entre sí y son perpendiculares al sentido de la pendiente producto de escurrimientos de su parte mas superficial por sobre-pastoreo. Ocurre generalmente sobre suelos superficiales con poca cobertura vegetal o zonas de cultivos (Fotografía 28).

Fotografía 28. Erosión Antrópica generada por la siembra de cultivos en las partes altas de las laderas



Formas que resultan de acciones particulares: Estas corresponden a procesos en los cuales intervienen los principales agentes climáticos como viento, agua, hielo, que actúan modificando el terreno ya sea erosionando o acumulando material.

3.5 PROCESOS KARSTICOS

Formas resultantes de procesos kársticos. Dentro de estas formas se aprecian las siguientes geoformas:

Fotografía 29. Formas erosionadas por la acción de agentes climáticos como el viento y el agua.



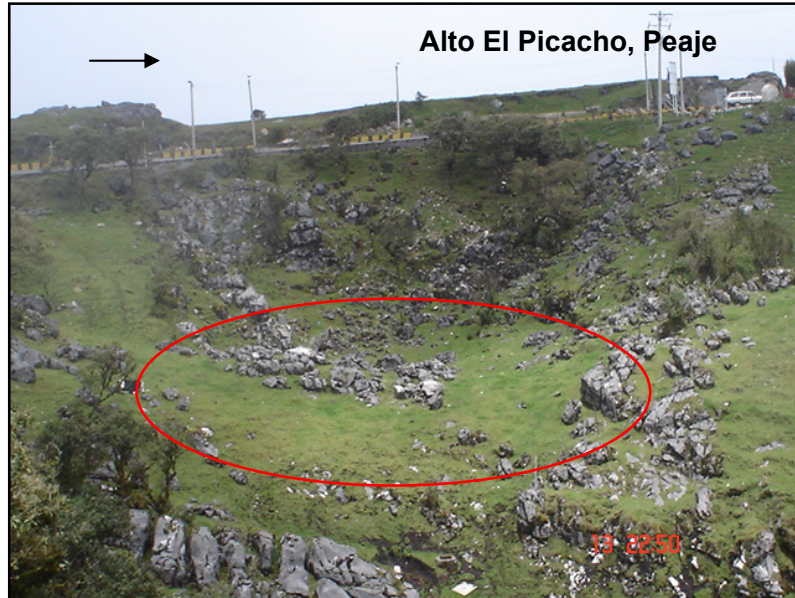
3.5.1 Dolinas. Es una depresión en forma de embudo, de boca reducida u ovalada, propia de zonas calcáreas y que se forman por disolución de las calizas cuando estas afloran superficialmente. Se presentan sobre la Formación Rosablanca cuya litología predominante son calizas, material que favorece el desarrollo de este tipo de procesos por acción del agua, estas se aprecian hacia el sector del peaje del Picacho (Alto El Picacho), y sector Llano Adentro (Fotografía 30).

3.6 PROCESOS GLACIARES

Formas resultantes de procesos glaciares. Las siguientes geoformas hacen parte de estos procesos:

3.6.1 Morrenas. Son acumulaciones de materiales mal calibrados, no estratificados y depositados principalmente por la acción de un glaciar. Los depósitos morrénicos en el área se presenta con espesor muy delgado y se manifiestan en el terreno como ligeras ondulaciones. Están constituidos de material heterogéneo con fragmentos subangulares a subredondeados, esta geoformas se hacen evidentes en el sector del Altiplano de Berlín, hacia el sector de la Quebrada El Cebollal y Laguna de San Miguel (Fotografía 31).

Fotografía 30. Dolinas en calizas de la Formación Rosa Blanca, Sector el Peaje (Alto El Picacho)



Fotografía 31. Depósitos de morrenas en el Altiplano del Páramo de Berlín



4. METEORIZACIÓN Y ARCILLAS

En ambientes de alta montaña, dominados por temperaturas bajas y por lluvias abundantes, la meteorización de las rocas es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldspatos y minerales ferromagnesianos y los compuestos más resistentes como las partículas de mica y cuarzo permanecen.

La meteorización de rocas conduce a la formación de minerales arcillosos como montmorillonitas, aloysitas, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización y finalmente se pueden formar caolinitas, esmectitas y gibsitas (González y Jiménez – 1981). Algunas rocas que contienen sales (NaCl), Cal (CaO) y Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se disuelven fácilmente en agua, especialmente en presencia de CO_2 , acelerando el proceso de meteorización. A medida que el proceso de meteorización continúa los contenidos de caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a Fe_2O_3 y Al_2O_3 .

4.1 METEORIZACIÓN

Es la rotura o la disgregación de una roca sobre la superficie de la Tierra, en la que se forma un manto de roca alterada (regolito) que permanece in-situ.

La mayoría de las rocas aflorantes son sometidas a condiciones que difieren de las prevalentes durante su formación. La meteorización consiste en el reajuste termodinámico de estas rocas a las condiciones de la superficie. Las condiciones ambientales cambian durante la escala del tiempo geológico, y estas variaciones son registradas en los perfiles de meteorización.

4.1.1 Tipos de Meteorización

▫ Meteorización mecánica

La meteorización mecánica o física consiste en la ruptura de las rocas a causa de esfuerzos externos e internos. Son sinónimos, y más exactos, los términos de disgregación y fragmentación. La disgregación implica la ruptura de la roca en fragmentos más o menos grandes y angulosos pero sin modificación de la

naturaleza mineralógica de la roca. Los calibres pueden ir desde la arcilla, a la marga, el limo, la arena y hasta los fragmentos de varios metros.

Los procesos más importantes de meteorización mecánica son: termoclastia, gelifracción hidroclastia, haloclastia.

▫ **Meteorización química.**

Es un proceso que consiste en la descomposición o rotura de las rocas por medio de reacciones químicas. La descomposición se debe a la eliminación de los agentes que cementan la roca, e incluso afectan a los enlaces químicos del mineral. Es posible que en el proceso, y debido a las reacciones químicas, se formen materiales nuevos. El calibre de los materiales es siempre muy reducido: arcillas, margas, limos, arenas. Su acción es muy notable en la formación del relieve de rocas masivas, cárstico, rocas metamórficas y volcánicas.

Algunos autores consideran la meteorización química como sinónimo de disolución y otros lo hacen sinónimo de alteración. Comprende dos procesos básicos la disolución y la alteración (oxidación, hidratación e hidrólisis).

▫ **Meteorización biológica**

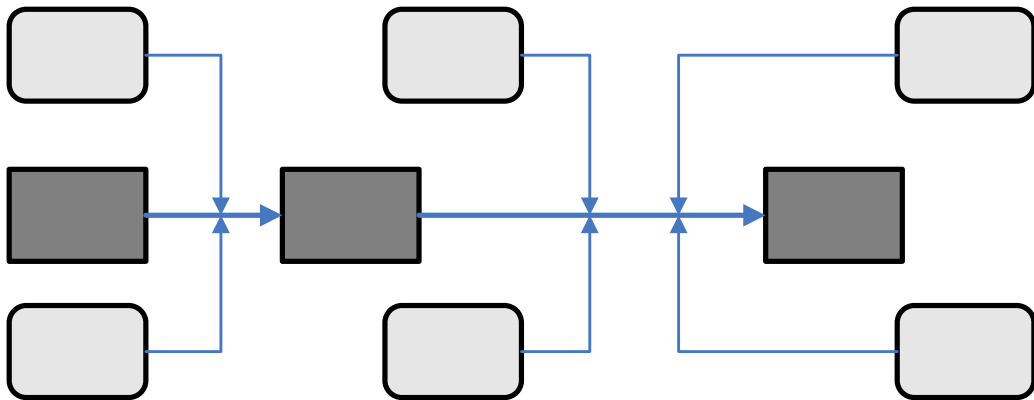
Consiste en la ruptura de las rocas por la actividad de animales y plantas. La construcción de madrigueras y la acción de las raíces de los árboles pueden provocar una acción mecánica, mientras que los efectos de la presencia de agua y diversos ácidos orgánicos, así como el aumento del dióxido de carbono, pueden complementar la meteorización alterando la roca. Así pues, los efectos de la meteorización biológica combinan los procesos de disgregación y los de alteración.

4.1.2 Etapas del proceso de meteorización. Los factores de formación y evolución del suelo son cuatro:

- Material Parental: Permeabilidad y constituyentes minerales de la roca madre.
- Topografía: Pendientes, drenaje; orientación de la ladera.
- Formadores biológicos: Micro y macro fauna como fuente de humus.

- **Clima:** Temperatura, balance hídrico, intensidad de acción y velocidad de procesos.

Figura 8. Etapas y procesos de formación del suelo.



Fuente: Tomado de Duque G. 2000.

Estos factores varían lentamente y determinan la tendencia general y desarrollo de los procesos relacionados con la meteorización. Por esto es de fundamental importancia considerar las variaciones del clima y vegetación en los efectos sobre la intensidad de la meteorización y erosión de las rocas.

Existen también otros factores antrópicos que el hombre a través de sus actividades no controladas conduce a mecanismos aceleradores de este proceso. Tales factores son la deforestación, el sobrepastoreo y el manejo inadecuado del suelo

En general un proceso mecánico de meteorización involucra tres etapas así:

▫ **Desintegración**

Se abren las diaclasas por eventos tectónicos y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión.

Meteorización
Mecánica

Agua

Aire

▫ **Descomposición**

Se incrementa el contenido de arcilla y de suelo en general y se disminuye la fricción. La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos químicos incluyen la hidrólisis y el intercambio catiónico. Los procesos biológicos pueden incluir efectos de las raíces, oxidación bacteriológica y reducción de hierro y compuestos del azufre.

▫ **Oxidación y recementación**

En la mayoría de los procesos de meteorización en las rocas ígneas predominan los procesos químicos, mientras en las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos, sin embargo estos procesos se interrelacionan. La meteorización generalmente, avanza hacia abajo de la superficie y a través de las diaclasas y demás conductos de percolación como las fracturas, produciendo variaciones de intensidad de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto.

Cuando la meteorización es incipiente los bloques son grandes y controlan en parte el comportamiento del talud, pero a medida que se hace más intenso el factor más importante es la resistencia del suelo meteorizado que actúa como matriz de los bloques independientes.

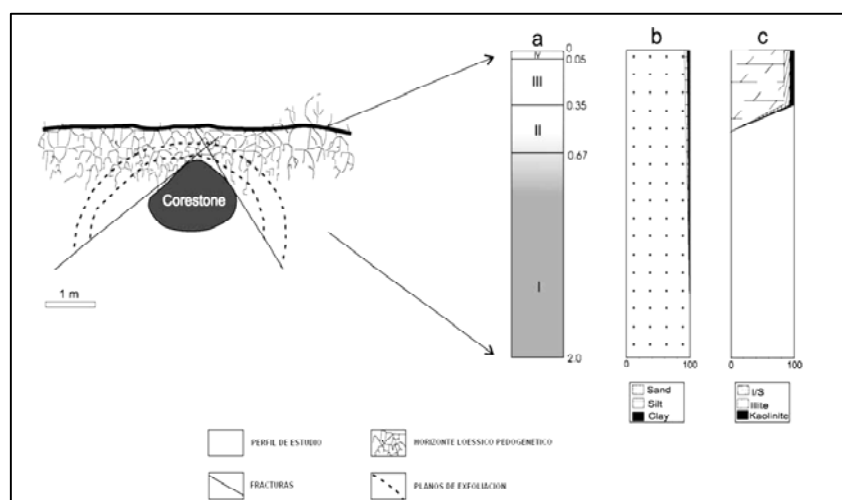
La caracterización de los niveles de meteorización debido a su heterogeneidad, requiere de un análisis integral que tenga en cuenta todos los factores que afectan su comportamiento, lo cual incluye el grado y proceso de meteorización, su mineralogía, microestructura, clasificación y caracterización de la roca parental.

4.2 METODOLOGÍA DE CAMPO.

Las áreas a definir para caracterización y muestreo se ubicaron en base a afloramientos con buena exposición del perfil de meteorización el cual puede relacionarse directamente con la roca parental. Estos perfiles se ubicaron a diferentes alturas topográficas y cada horizonte fue definido dentro de cada perfil teniendo en cuenta las características macroscópicas (Figura 9), tales como coloración, compactación, textura y mineralogía.

Los análisis químicos e identificación de la mineralogía de las arcillas de cada horizonte se desarrollaron usando una combinación de análisis granulométricos y difracción de rayos x.

Figura 9. (a) Detalle del Perfil; (b) Fracción de tamaño de grano (la escasez de cohesión primaria hace posible un estudio granulométrico desde la base del perfil); (c) Porcentajes de mineral arcilla.



Fuente: Tomado de Journal of South American Earth Sciences 2005.

▫ **Ubicación geográfica.**

Descripción detallada del sitio donde se tomó la muestra con coordenadas, además se define la unidad litoestratigráfica, los horizontes observados y el espesor de todo el perfil, tomando una muestra 0.5 – 1 Kg. debidamente empacada para evitar su contaminación.

▫ **Características Macroscópicas de los niveles de roca meteorizada.**

Se define el grado de desarrollo de la meteorización (bajo, medio, alto basado en BS 5930,1981), describiendo las forma de disgregación del material litológico, su coloración, cantidad de materia orgánica, mineralogía y granulometría, indicando la evolución de cada nivel respecto al horizonte en general.

▫ **Características Petrográficas del protolito o roca parental.**

Descripción de las fases minerales, tamaño de los cristales, texturas, alteración; a partir de lupas binoculares.

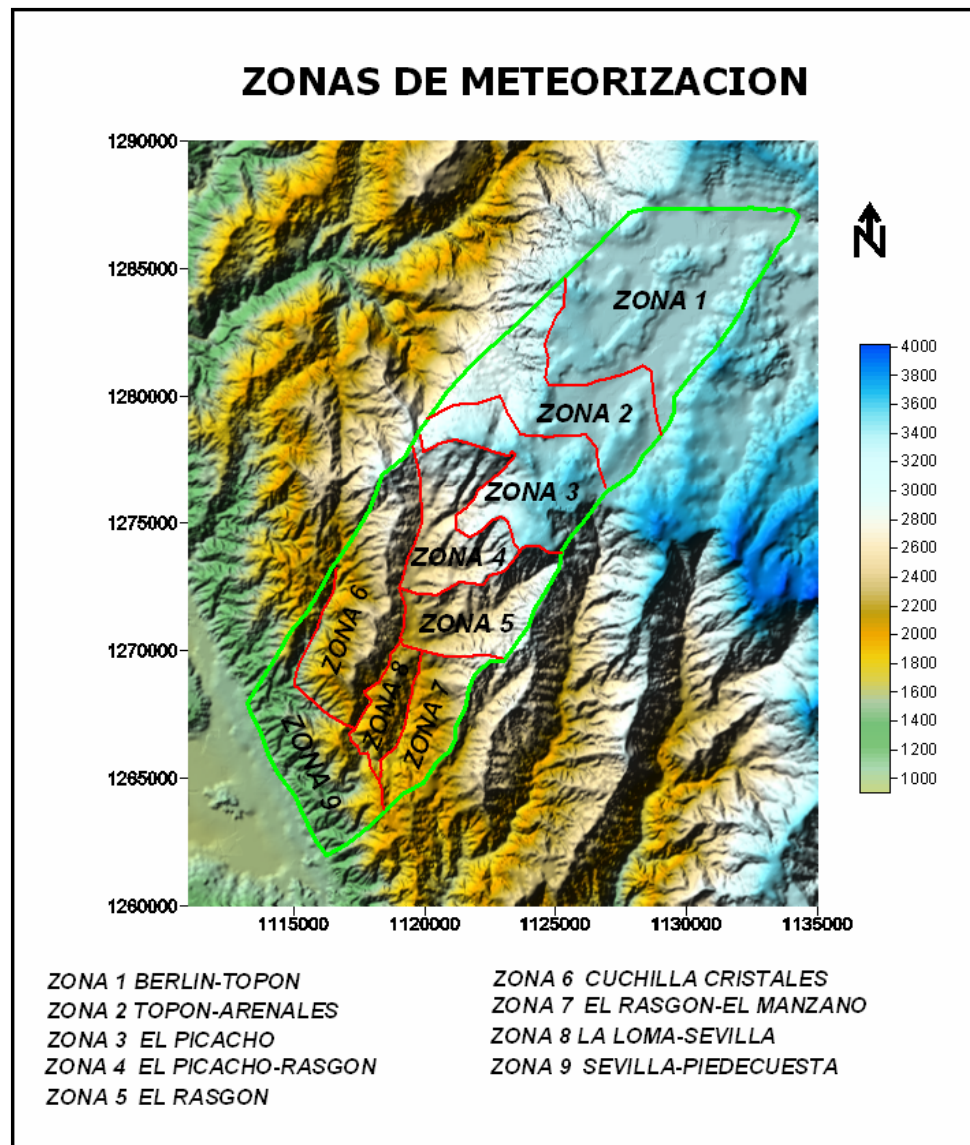
4.3 ZONAS DE METEORIZACIÓN

La cuenca del río de Oro, correspondiente al Macizo de Santander está constituida litológicamente por los tres tipos de rocas (ígneas, metamórficas y sedimentarias) y se caracteriza por una compleja distribución estructural, todos estos aspectos sumados a factores climáticos han generado una distribución heterogénea de perfiles de meteorización, los cuales presentan una mezcla de características físicas, composicionales y texturales. Debido a que uno de los objetivos del proyecto es analizar el aspecto hidrogeológico de la cuenca, se hizo necesario en este proyecto definir zonas de meteorización presentes en el área de estudio. Posteriormente en estas zonas de meteorización se tomaron muestras que fueron tratadas y analizadas por medio de la técnica de difracción de rayos X, por medio de la cual se determinaron los minerales arcillosos y sus respectivos porcentajes (Figura 10, Anexo E).

▫ **Zona 1 Berlín-Topón. (Meteorización media).**

Esta zona se caracteriza por presentar un clima árido con temperaturas bajas lo que favorece procesos de gelifración que hacen que las rocas allí presentes posean un nivel de meteorización medio. La zona está caracterizada por la presencia de colinas onduladas en donde se aprecia la formación de cárcavas producto de la acción del agua superficial (Fotografía 32). La vegetación que se observa es muy escasa y corresponde a pastizales y zonas de cultivos. Los perfiles de suelo que allí se generan son de textura arcillo-arenosa que generalmente poseen un color rosado, los cuales presentan espesores aproximados de 50 a 100 cm donde el nivel orgánico de estos perfiles alcanza un espesor de 30 cm. aproximadamente. En el aspecto hidrogeológico esta zona es favorable ya que la textura de los perfiles de meteorización le confiere un buen grado de porosidad, que es una característica que favorece la filtración de agua.

Figura 10. Mapa de meteorización de la cuenca del Río de Oro.



Las rocas que afloran en esta zona son metamórficas (Ortoneis de Berlín) e ígneas (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara)

Fotografía32. Cárcavas formadas por el efecto del agua de escorrentía.



▫ **Zona 2 Topón-Arenales. (Meteorización media).**

Esta zona presenta un clima árido, donde la vegetación es escasa y corresponde a zonas de pastizales de corta altura. El clima es frío y árido. Los perfiles de meteorización que se aprecian son de una textura limo-arenosa que tienen un color beige, también se observan unos parches de oxidación. Este sector presenta perfiles de meteorización con espesores de aproximadamente 1.5 mts, el nivel orgánico alcanza los 40 cm. de espesor. La textura arenosa de los perfiles es un buen indicio para el aspecto de la hidrogeología ya que le proporciona a la zona condiciones de porosidad que ayudan a la filtración del agua.

Las rocas que afloran en esta zona corresponden al Ortoneis de Berlín.

▫ **Zona 3 El Picacho. (Meteorización baja).**

Esta zona se caracteriza por una geomorfología de pendientes altas, con zonas de escarpes, con un clima frío. La meteorización química actúa de manera importante en este sector ya que allí afloran rocas carbonatadas de la Formación Rosa Blanca (Fotografía 33). Se observan estructuras de disolución, como dolinas que van de pequeñas a muy grandes dimensiones. También se observan diaclasas abiertas. En los perfiles de suelo que se producen en la zona el nivel orgánico alcanza los 15 cm. de espesor. La disolución le confiere a esta zona unas características de porosidad

y las diaclasas abiertas influyen en la permeabilidad, dándole a la zona buenas condiciones para el almacenamiento y el flujo de agua.

Las rocas que afloran en esta zona son areniscas y calizas de las formaciones Tambor y Rosa Blanca.

Fotografía 33. Procesos de disolución que afectan las calizas de la Formación Rosa Blanca.



▫ **Zona 4 El Picacho-Rasgón. (Meteorización baja).**

Esta zona se caracteriza por presentar pendientes abruptas y una vegetación abundante que corresponde a pastizales y árboles de tamaños considerables. El nivel de meteorización es medio en los alrededores del Picacho y aumenta a medida que se llega a la zona de la quebrada el Rasgón (Fotografía 34). Los perfiles de suelo que se observan en esta zona poseen un color beige y tienen una textura areno-arcillosa con espesores menores a los 50 cms. El nivel orgánico alcanza los 40 cm. Las condiciones de la zona en el aspecto hidrogeológico se centran en la porosidad que puedan tener estos suelos.

En esta zona afloran esquistos de la Formación Silgará y rocas sedimentarias.

Fotografía 34. Roca medianamente meteorizada.



▫ **Zona 5 El Rasgón. (Meteorización alta)**

La zona se caracteriza por presentar una vegetación muy abundante correspondiente a un bosque primario, el cual es una reserva forestal perteneciente a la C.D.M.B. Tiene unas condiciones de humedad altas que hacen que la meteorización actúe en forma muy activa generando unos perfiles de suelo de color rojizo con una textura totalmente arcillosa con espesores que superan los 3 metros de espesor. El nivel orgánico en estos perfiles es bien desarrollado y alcanza los 50 cm. de espesor. En el aspecto hidrogeológico esta zona se comporta como un buen sello ya que la presencia de arcillas es bastante alta.

En esta zona afloran rocas ígneas (Cuarzomonzonita de Santa Bárbara) y rocas metamórficas (Formación Silgará y Neis de Bucaramanga).

▫ **Zona 6 Cuchilla Cristales. (Meteorización media).**

La zona se caracteriza por presentar un clima calido. La vegetación es espesa y corresponde en su mayor parte a árboles y pastizales largos. Los perfiles de suelo que se muestran en esta zona, tienen un color café y presentan unas superficies de oxidación, la textura de estos perfiles es arcillo-arenosa y muestran un nivel orgánico incipiente que apenas alcanza los 10 cm. de espesor. En el aspecto hidrogeológico la característica predominante de la zona es la porosidad que puedan desarrollar estos suelos.

En esta zona afloran rocas ígneas pertenecientes a la Cuarzomonzonita de La Corcova.

▫ **Zona 7 El Rasgón-El Manzano. (Meteorización alta).**

En esta zona los perfiles de suelo son de color naranja y de una textura limo-arenosa con perfiles de meteorización de aproximadamente 2 metros, con un nivel orgánico que alcanza los 20 cm. de espesor (Fotografía 35). Hidrogeológicamente la zona posee cierta porosidad debida a la textura arenosa de los suelos que allí se presentan. En esta zona afloran rocas metamórficas que pertenecen al Neis de Bucaramanga.

Fotografía 35. Perfil de meteorización, sector el Manzano.



▫ **Zona 8 La Loma-Sevilla. (Meteorización Alta).**

Esta zona presenta un clima calido, alta vegetación y actividad antrópica. Los perfiles de meteorización que se observan tienen una textura arenosa y color blanco con espesores que alcanzan los 10 metros (Fotografía 36). Se aprecian superficies de oxidación y un nivel orgánico que alcanza los 15 cm. Hay cárcavas. La textura de los perfiles de meteorización de la zona indica que existen ciertas condiciones de permeabilidad. En esta zona aflora la Cuarzomonzonita de La Corcova.

Fotografía 36. Perfil de meteorización, presencia de cárcavas.



▫ **Zona 9 Sevilla-Piedecuesta. (Meteorización alta).**

La zona se caracteriza por presentar un clima calido y una vegetación espesa. Los perfiles de meteorización presentan un color beige y una textura arenosa en la parte alta de esta zona con espesores mayores a 15 metros. Hacia el sector de la falla Bucaramanga-Santa Marta, en cercanías del municipio de Piedecuesta la

meteorización aumenta y los perfiles de meteorización toman un color naranja y una textura arcillosa (Fotografía 37). Hacia Piedecuesta el nivel orgánico se hace más grueso. Hidrogeológicamente la zona posee condiciones de porosidad favorables para el almacenamiento de agua. La unidad litológica que aflora en esta zona es el Neis de Bucaramanga.

Fotografía 37. Perfil de meteorización en el Neis de Bucaramanga.



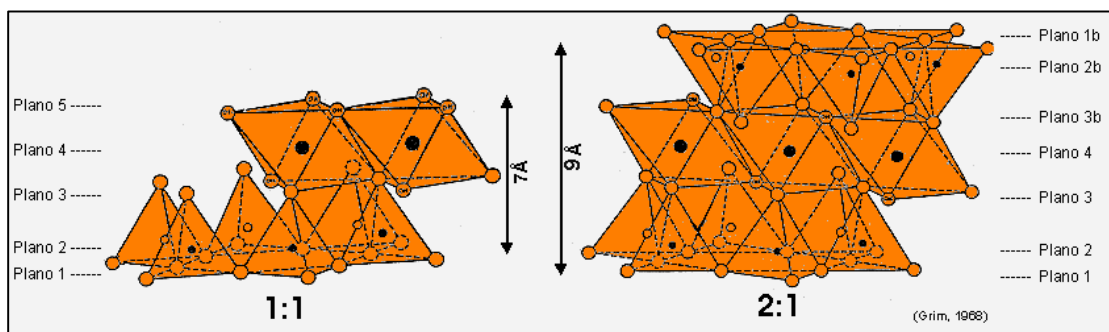
4.4 GENERALIDADES Y GRUPOS DE ARCILLAS

Actualmente se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de las capas y por la simetría de la red que forman entre sí. Estas redes estructurales no son perfectas, generalmente presentan huecos por falta de iones o por sustitución de unos iones por otros que distorsionan la estructura y generan diferencias entre familias. Es bueno tener presente que en los depósitos naturales siempre coexisten varias clases de minerales arcillosos simples e interstratificados acompañados de óxidos de hierro o de titanio, piritas, yeso, calcita, feldespatos y otros minerales. La formación de los minerales arcillosos está influenciada en gran medida por los procesos de meteorización, y su presencia o ausencia pueden dar una noción del comportamiento hidrogeológico en estas zonas de alteración, los minerales que están en mayor proporción son los encargados de condicionar estas características.

Las propiedades mecánicas desde el punto de vista hidrogeológico en las arcillas dependen de su composición físico-químicas que son:

- Su tamaño de partícula (inferior a 2 μm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Figura 11. Estructura interna de los filosilicatos formando tetraedros y octaedros.



Fuente: Tomado González J.M., 2000.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interactuar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar.

▫ **Capacidad de absorción**

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

▫ **Hidratación e hinchamiento**

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmeclitas, y su importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmeclitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmeclita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

▫ **Plasticidad**

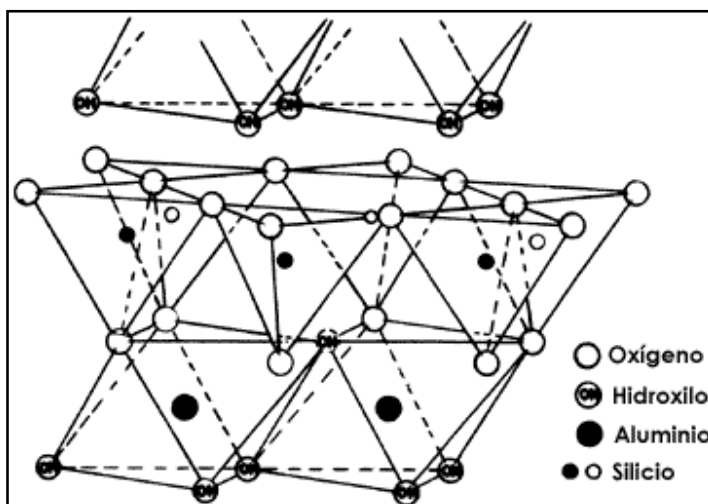
Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia,

nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

De acuerdo con su distribución estructural los minerales arcillosos se pueden dividir en las siguientes familias o grupos:

4.4.1 Filósilicatos bilaminares. Los filósilicatos bilaminares están formados por dos capas: una tetraédrica y otra octaédrica, por eso reciben los nombres de bilaminares, 1:1 ó T: O (Figura 11).

Figura 12. Una lámina T-O.



Fuente: Tomado de García E, 2006. www.uclm.es/user/higueras/yym/arcillas/htm

Generalmente los tetraedros son de silicio, rodeados por oxígeno, aun cuando en ocasiones el silicio puede estar sustituido por iones de aluminio o de hierro. Los octaedros pueden tener como ión predominante el aluminio o el magnesio y están rodeados de oxígeno o de hidróxilos (OH). Las capas tetraédrica y octaédrica constituyen una lámina. La separación entre láminas es del orden de 7 unidades amstrong (Å). En esta clasificación se distinguen dos familias de minerales: la de la Caolinita y la de las Serpentinatas.

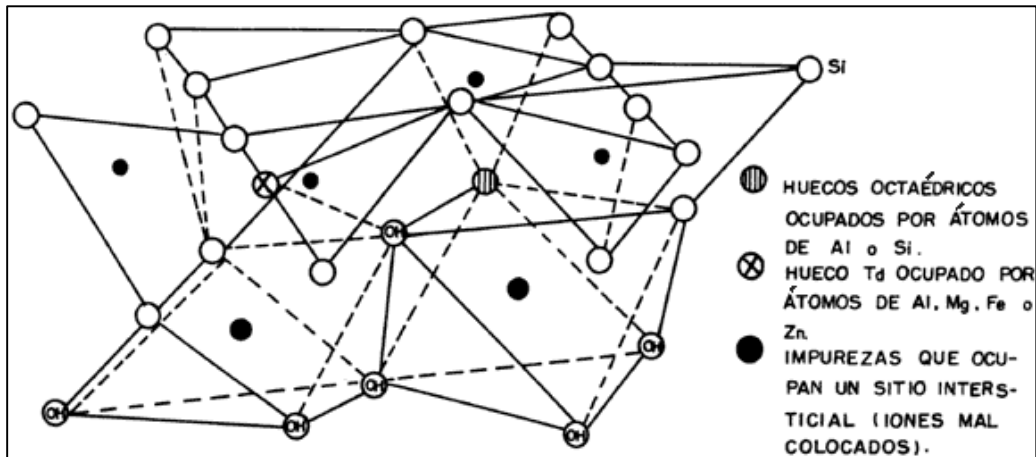
▫ **Familia de la Caolinita**

Según Besoain (1985), son posiblemente los minerales arcillosos más extendidos y frecuentes en el mundo y comprenden la caolinita, la alosita, la nacrita y la dickita. La composición química de la Caolinita puede expresarse como $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Los distintos minerales se distinguen por los diferentes apilamientos de las capas octaédricas y tetraédricas, la simetría de la red cristalina y la mayor o menor inclusión de moléculas de agua.

Su ocurrencia es común como un producto de alteración de feldespatos y micas, generados principalmente en condiciones de bajo pH y abundante disponibilidad de agua y de sedimentos provenientes de rocas que contienen dichos minerales. (Ígneas y metamórficas). En condiciones de clima cálido y húmedo la sedimentación de la caolinita es suficientemente abundante para formar un caolín puro.

Los suelos con caolinita como mineral de arcilla presentan un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad y permeabilidad. El efecto del aumento de humedad sobre las propiedades del suelo generalmente, no es importante, ya que esta se comporta como un mineral no expansivo.

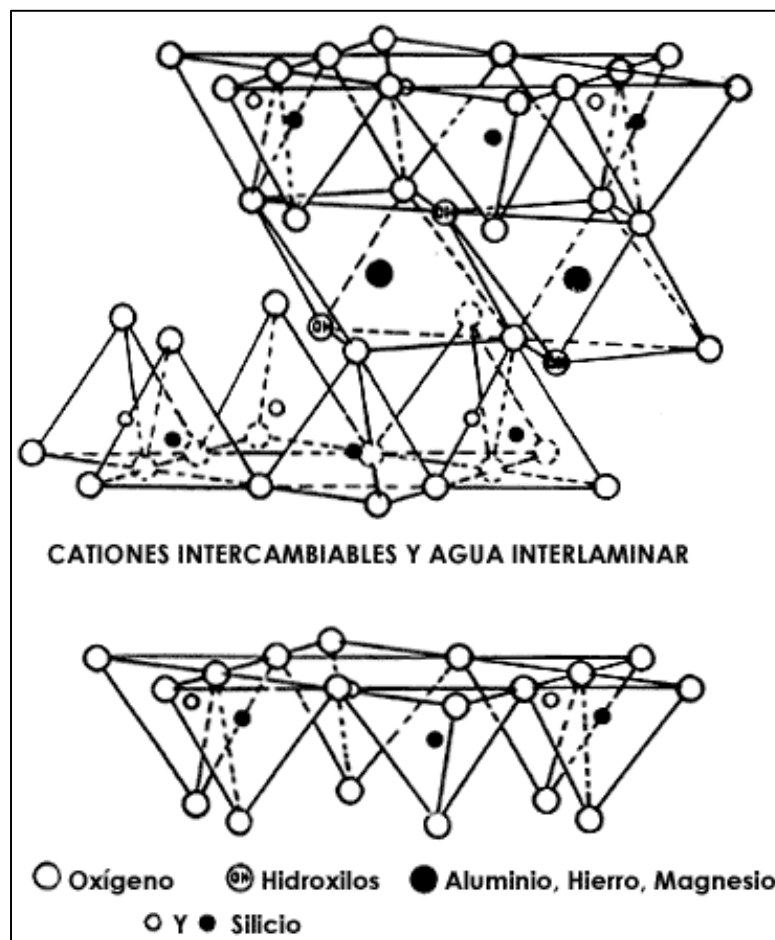
Figura 13. Estructura elemental de la Caolinita.



Fuente: Tomado de Bernal I. y Cabezas H. 2003.

4.4.2 Filosilicatos trilaminares. Cada lámina está formada por dos capas de tetraedros de sílice que encierran una capa de octaedros de alúmina o de magnesia, por ésta razón se les denomina “trilaminares”, 2:1 ó T: O:T. Las láminas no son eléctricamente neutras debido a que se presentan sustituciones de unos iones por otros de diferente carga. La separación entre láminas es del orden de 10Å. Comprenden tres familias: Esmeectitas, Micas y minerales fibrosos o Atapulgita.

Figura 14. Una lámina T-O-T.



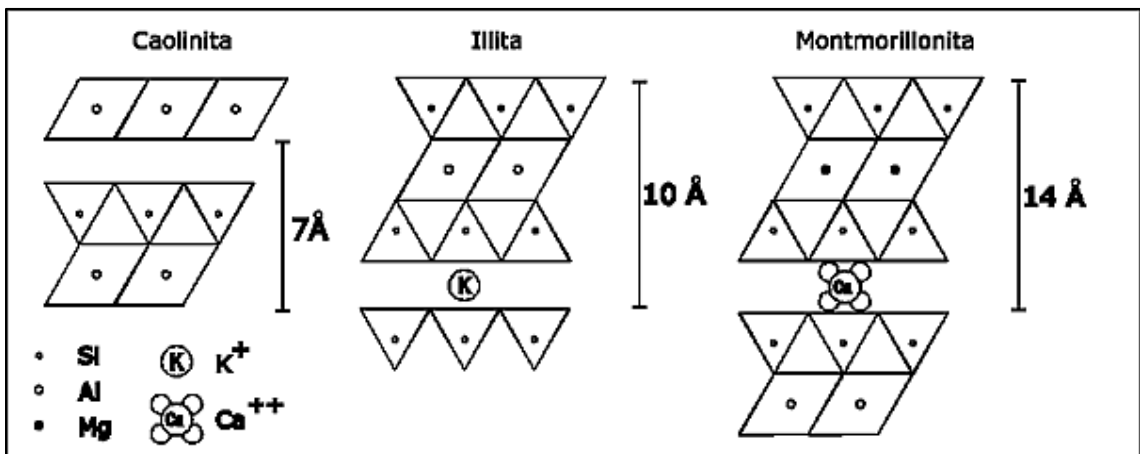
Fuente: Tomado de García E, 2001 2006 www.uclm.es/user/higueras/yym/arcillas/htm

▫ **Familia de las Esmectitas o minerales expandibles.**

Esta familia incluye especies dioctaédricas como la Montmorillonita (Figura 14), la nontronita y la beidelita y trioctaédricas como la Saponita, la sauconita y la hectorita. También se les da el nombre de Bentonitas. Su composición química varía por la capacidad de sustitución elemental y de absorción de agua; una fórmula general para una Esmectita es: $Al_{2-x}Mg_xSi_4O_{10}(OH)_2$. En general, las arcillas expandibles, presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de enlaces de hidrógeno, lo cual determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad y alta capacidad de retención que le permite actuar como zonas de acumulación cuando su contenido es considerable.

La montmorillonita se forma como producto de alteración en condiciones alcalinas, con rocas ricas en plagioclasa, piroxenos y generalmente de minerales con un elevado contenido de calcio y magnesio (Pegmatitas y dioritas), o como producto de la meteorización durante la generación de rocas sedimentarias. La montmorillonita se transforma en illita, cuando su composición mineralógica y su disposición estructural se presenta como capas mixtas en sus iones, muy común este proceso en arcillas subcompactadas.

Figura 15. Estructura elemental de la Montmorillonita, illita y caolinita.



Fuente: Tomado de Bernal I. y Cabezas H. 2003.

▫ **Familia de las Micas**

Esta familia sigue el mismo esquema de cristalización de la anterior pero sus minerales no son expandibles; a este grupo pertenecen las vermiculitas, el talco, la pirofilita, la illita, la moscovita. En la celda cristalográfica de las micas algunos silicios pueden estar reemplazados por aluminio y la diferencia de carga está balanceada por iones Potasio.

La illita se forma como producto de alteración de micas y feldespatos. En condiciones óptimas para su formación corresponden a un pH elevado y rocas ricas en minerales portadores de aluminio y potasio, también se forman a partir de diagénesis de caolinita o montmorillonita bajo la influencia de temperatura, presión, concentración iónica y consecuente profundidad de soterramiento.

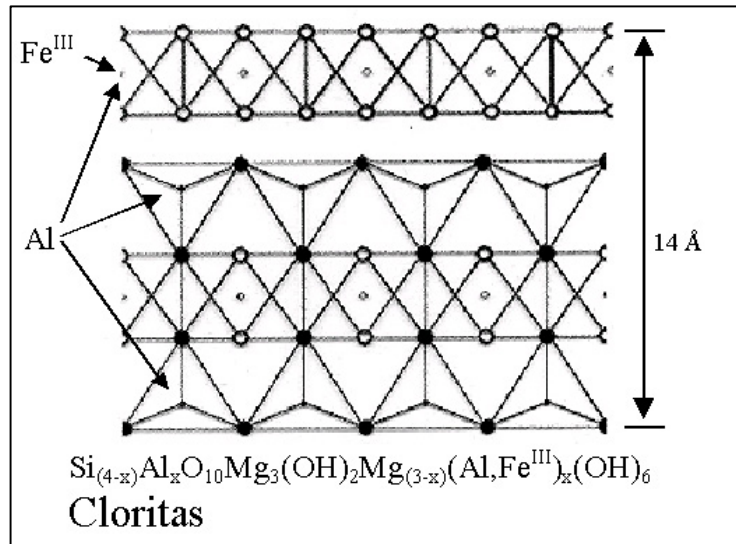
La estructura elemental de la Illita y su composición química puede expresarse como $K Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$. El índice de plasticidad de los minerales de esta familia es menor que el de las Esmectitas, pero su plasticidad aumenta a medida que disminuye el tamaño del grano.

Cloritas. Son un grupo de minerales cuyas láminas están compuestas por dos capas tetraédricas y dos octaédricas por lo que se les denomina 2:1:1 ó T:O:T:O. Las láminas no son eléctricamente neutras debido a sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga pero de tamaño semejante. La neutralidad se logra por grupos hidróxidos y por cationes interlaminares como sodio, potasio, calcio o magnesio. La separación entre láminas es del orden de 14 Å o más.

La fórmula general de las cloritas es $R^{5++} R^{3++} Si_3 R^{3++} O_{10} (OH)_8$ en la cual R^{2+} puede ser Fe ó Mg y R^{3+} puede ser Al ó Fe.

Son minerales propios de rocas metamórficas o de las sedimentarias derivadas de ellas y en el suelo siempre aparecen como heredadas del material original. Su evolución suele ser hacia vermiculita. Existe una variedad alumínica, en la que la capa adicional brucítica se ha sustituido por una gibsítica. Esta es propia del suelo y se forma por transformación de la illita mediante la alteración bioquímica en condiciones muy particulares, lo que la hace un mineral poco abundante.

Figura 16. Estructura interna del grupo de las cloritas.



Fuente: Tomado de Bernal I. y Cabezas H. 2003.

4.5 MUESTREO Y TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS.

Se recolectaron muestras en dieciocho puntos a lo largo de la zona de estudio, en diferentes zonas de mayor meteorización en las unidades aflorantes, se toman perpendicularmente al rumbo general del afloramiento, ubicando cada sitio con coordenadas GPS. Estos puntos corresponden a distintas zonas de la cuenca y se relacionan con cada una de las unidades cristalinas que afloran en el área de estudio.

Las muestras tomadas en campo fueron analizadas mediante lupa binocular, y difracción de rayos X (DRX), para lo cual se realizaron procedimientos adecuados para cada análisis de difracción de rayos X. Las muestras de neis, esquistos y cuarzomonzonitas fueron analizadas mediante difracción de rayos X (método de polvo), para lo cual las rocas fueron reducidas a polvo con un mortero de ágata. Para todas las muestras se separó la fracción con tamaño de arcilla (<2 μm) siguiendo las recomendaciones de Kisch (1991) y Moore y Reynolds (1997) para realizar el estudio de los minerales del grupo de las arcillas sobre agregados orientados.

4.5.1 Descripción. Este se hace por medio de un control sistemático de arcillas en el área de trabajo; teniendo en cuenta la cartografía geológica hecha previamente en campo, podemos determinar los puntos mas aconsejables para la recolección de muestras; esto depende principalmente del grado de incidencia que puedan tener estas arcillas en el desarrollo hidrogeológico de la zona y bajo el criterio del geólogo de campo.

Primero se describe la muestra en el afloramiento; esta descripción se hace tomando rasgos particulares del deposito arcilloso, como lo es, estructura, textura, color y composición; para luego clasificarla en cuatro tipos diferentes.

Los grados de clasificación son:

Arcilla tipo 1: Presenta una estructura relativamente bien definida y poco alterada indicando la relación con la roca madre, en donde se pueden apreciar rasgos como la laminación interna; presenta una textura bien compactada, bien calibrada, aunque el grado de cimentación es muy bajo o no tiene; colores relativamente definidos aunque afectados por el grado de oxidación y meteorización que tenga; su composición es propia de la roca parental, aunque alterada debido a la influencia de la meteorización que ésta haya sufrido.

Arcilla tipo 2: No presenta estructura y su parentesco con la roca fuente es difícil de definir a no ser que no haya sufrido mucho transporte; presenta una textura moderada a bien compactada, se encuentra bien calibrada debido a que ha sufrido un grado de lixiviación que ayuda a mejorar la selección de los granos que la componen, no presenta prácticamente grado de cimentación; colores relativamente definidos aunque afectados por el grado de oxidación y meteorización que tenga; su composición es propia de la roca parental, aunque alterado debido a la influencia de la meteorización que esta haya sufrido y la formación de nuevos minerales.

Arcilla tipo 3: No presenta estructura y su parentesco con la roca fuente es difícil de definir a no ser que no haya sufrido mucho transporte, presenta una textura donde el grado de compactación, depende de la asociación de los minerales arcillosos presentes (sean expansivos o no expansivos), se encuentra bien calibrada debido a que ha sufrido un grado de lixiviación moderado que ayuda a mejorar la selección de los granos que la componen, no presenta ningún grado de

cimentación; colores poco definidos a manera de tonalidades abigarradas (en el caso en que su mayor componente sea materia siliciclástica) o definidos (en el caso en que su mayor componente sea la materia orgánica), afectados por el grado de oxidación y meteorización que tenga; su composición esta ligada en parte a la roca parental, muy alterado debido a la influencia de la meteorización que esta haya sufrido por lo que se observa la formación de nuevos minerales.

Arcilla tipo 4: No presenta estructura y su parentesco con la roca fuente es difícil de definir, (se puede asociar fácilmente con suelo residual); presenta una textura donde el grado de compactación, depende de la asociación de los minerales arcillosos presentes (sean expansivos o no expansivos), se encuentra bien calibrada debido a que ha sufrido un grado de lixiviación alto que ayuda a mejorar la selección de los granos que la componen, no presenta ningún grado de cimentación; colores poco definidos a manera de tonalidades abigarradas (en el caso en que su mayor componente sea materia siliciclástica) o definidos (en el caso en que su mayor componente sea la materia orgánica), afectados por el grado de oxidación y meteorización que tenga; su composición esta ligada en parte a la roca parental, muy alterado debido a la influencia de la meteorización que esta haya sufrido por lo que se observa la formación de nuevos minerales.

Después de realizada la descripción del deposito, se procedió a recolectar una muestra significativa de 500 gr. aproximadamente in situ, indicando su localización geográfica y se almacenó en una bolsa bien sellada con el fin de no contaminar la muestra.

4.5.2 Fase de laboratorio. Después de tomada la muestra se llevó al laboratorio para un posterior tratamiento, con el fin de seleccionar la fracción limo y arcilla, que corresponden a los minerales silicatados, los cuales nos darán información esencial sobre la relación que estos tienen con los procesos hidrogeológicos en la zona de estudio.

Materiales:

- Materiales. Mortero de ágata.
- Tamiz (malla 100 y malla 200).

- Bolsas para muestras (capacidad 12 gr.)
- Bolsas para testigos (capacidad 50 gr.)
- Frasco lavador.
- Vaso de precipitado.
- Pipeta de 25 ml.
- Pipeta de 50 ml.
- HCl (0.2 N).
- Agua destilada (pH-7).
- Amoníaco (NH₄).
- Botella de 30 plástica ml.
- Botella de 60 plástica ml.
- Centrifuga.
- Horno.
- Portaobjeto petrográfico.
- Etilenglicol.
- Desecador.
- Difractómetro de RX.
- Balanza de precisión.

▫ **Procedimiento.**

El registro y la descripción de la muestra ya fue efectuado previamente durante la fase de campo, a partir de este punto el paso a seguir es tomar 50 gr. de muestra; si la muestra no está lo suficientemente seca se procede a realizar el secado de la misma en el horno a 80° C durante 2 horas (la temperatura y el tiempo de secado son los más indicados para no alterar la composición original de la muestra). Con la muestra ya en óptimas condiciones se procede a macerar en un mortero de ágata (Fotografía 32) para facilitar el proceso de tamizado (Fotografía 33); en el proceso de tamizado se emplean la malla de 100 para obtener 12 gr. de muestra con un tamaño de 150 µm, y la malla de 200 para obtener 12 gr. de muestra con un tamaño de 75 µm. Estas muestras se etiquetan y se empacan en bolsas sellables, el

sobranante de muestra durante este proceso es igualmente empacado y etiquetado como testigo en bolsas sellables con capacidad de 50 gr. (Fotografía 34).

Fotografía 38. Proceso de macerado.



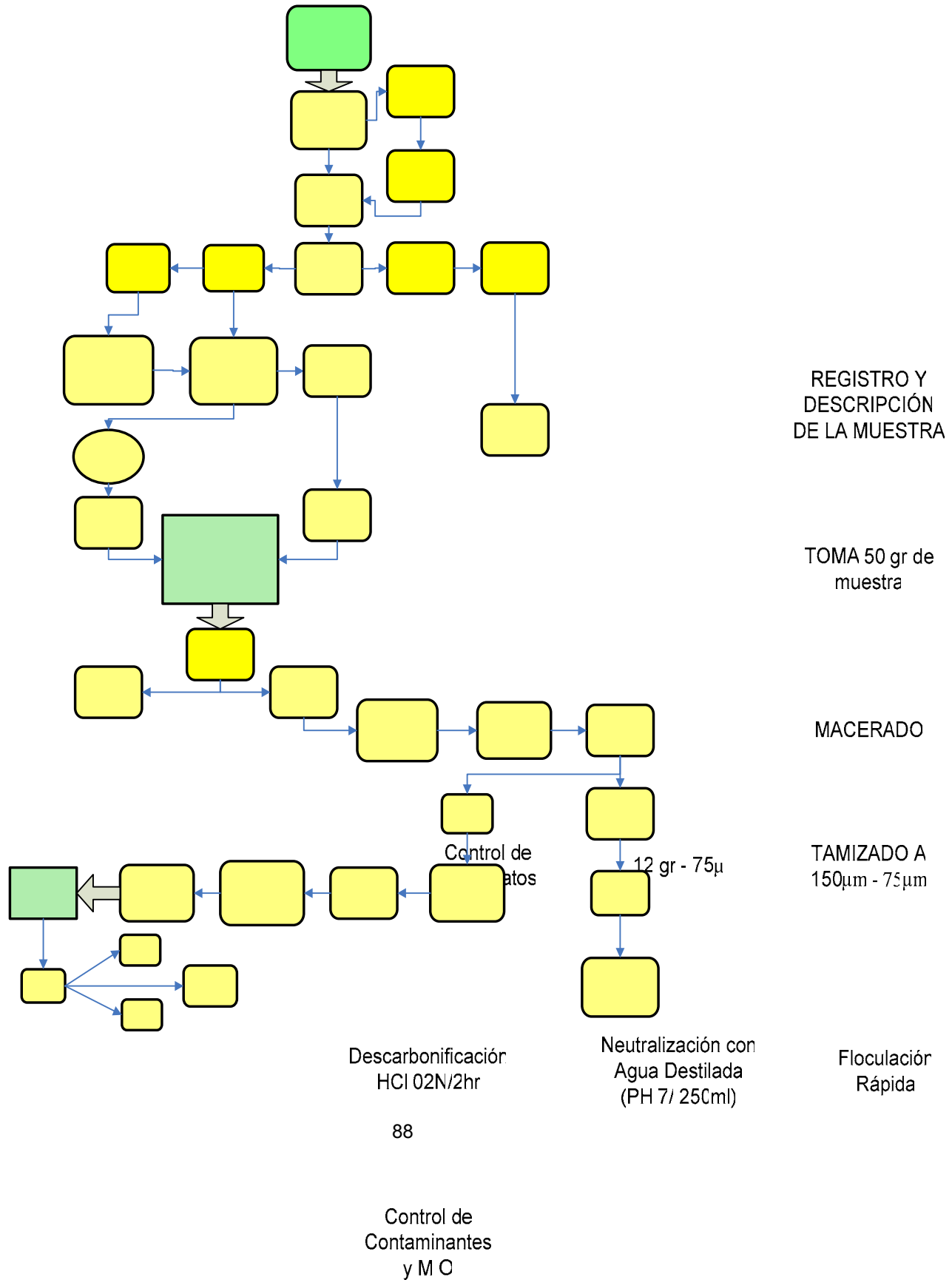
Fotografía 39. Proceso de tamizado



Fotografía 40. Embalado y etiquetado



Figura 17. Metodología para el análisis de arcillas.



La muestra de tamaño 150 μm , se lleva al laboratorio de RX para realizar el tratamiento denominado “polvos desorientados”, donde la muestra es evaluada por el difractómetro, en un rango de longitud de onda establecido ($2\theta - 30\theta$), con el fin de determinar mineralogías específicas como, el cuarzo, los feldespatos, y las arcillas; que representaran de manera semicuantitativa los diferentes tamaños de grano que hay en la muestra.

A la muestra de tamaño 75 μm , se le practica un control de carbonatos, el cual consiste en adicionar HCl con el fin de observar la reacción que esta tenga con el ácido (efervescencia); si esta reacciona efervesciendo con el acido procedemos a realizar el tratamiento de descarbonatización con HCl (0.2N durante 24 horas) (Fotografía 35) Con la muestra en ausencia de carbonatos procedemos a la neutralización con agua destilada (pH – 7).

Fotografía 41. Proceso descarbonatización.



Para la neutralización con agua destilada, adicionamos los 12 gr. de muestra en un vaso de precipitado y posteriormente agregamos agua destilada hasta completar 250 ml, posteriormente mezclamos el contenido constantemente con un agitador

hasta obtener una solución homogénea. En caso que la solución flocule, se debe adicionar 3 o 4 gotas de NH_4 el cual se encarga de cambiar la polaridad de las partículas, para que se mantengan en suspensión. Esta solución se debe mantener en reposo durante 25 minutos, con el fin que por medio de la ley de Stoke se forme una columna de agua en donde las partículas de grano fino se concentren en la parte superior de la columna por simple sedimentación. Transcurrido el tiempo de reposo se procede a pipetear los 25 ml superiores de la solución y se embasan en dos frascos de plástico con tapa. El restante se embasa en un frasco con tapa de 50 ml, el cual funcionara como testigo de la muestra. En caso que la muestra tenga materia orgánica se le debe adicionar 1 gramo de trifosfato de sodio y se debe agitar durante 20 minutos, el cual se encargara de precipitar la materia orgánica y separarla del resto de la muestra, luego se debe seguir el proceso normal de suspensión de arcillas por sedimentación (ley de Stoke).

Los dos frascos con 25 ml se pesan en una balanza de precisión (Fotografía 36). Posteriormente se llevan a un proceso de centrifugación a 40 RPM durante 10 minutos. (Fotografía 37). En este proceso se selecciona la muestra en donde se extrae y se prepara una solución original de 50 cc, reduciéndose el tamaño de los granos en suspensión a $15 \mu\text{m}$.

Fotografía 42. Balanza de precisión.



Fotografía 43. Centrifugadora



Las dos botellas con solución original son empleadas para diferentes propósitos. Una es almacenada para post-tratamientos (saturaciones, ataque de ácidos, etc.). La botella restante se somete nuevamente a un proceso de sedimentación (ley de Stoke), durante 50 minutos. Luego de transcurrido el tiempo de suspensión, se extrae la fracción mas fina la cual presenta un tamaño de 2 μm , y se encuentra acumulada en la parte superior de la columna de agua (los primeros 4 cc); esta es extraída con una pipeta de 25 ml, y esparcida de manera homogénea sobre un portaobjeto petrográfico el cual debe encontrarse esmerilado para captar la muestra de manera uniforme (Fotografía 38). Esta se deja secar durante 7 horas a temperatura ambiente y de esta manera obtenemos una lámina con agregado orientado, la cual se analiza mediante una rutina básica para determinar el contenido mineralógico de las arcillas que la componen.

Fotografía 44. Preparación de la lámina.



La rutina básica consiste en manipular la lámina orientada mediante 3 procesos de la siguiente manera. El primer proceso se denomina tratamiento normal; consiste en someter la lámina original a la irradiación de RX por medio de un difractómetro con un rango de longitud de onda que varía entre 2θ y 30θ . El segundo proceso consiste en hidratar la muestra con etilenglicol; esto se realiza mediante la introducción de la muestra en un desecador y posteriormente llevándola a un horno (Fotografía 39)

donde es sometido a una temperatura de 40° C durante 8 horas (el alcohol evaporado se incorpora dentro de los intersticios de las arcillas hidratándolas y separándolas). Transcurrido este tiempo la lámina es sometida nuevamente a irradiación de RX con un rango que varia entre 2e y 20e. El tercer y último proceso consiste en quemar la lámina con etilenglicol en el horno a una temperatura de 500° C durante 4 horas, con el fin de eliminar por completo la humedad que hay en la muestra para luego ser sometida a irradiación de RX en un rango variable de longitud de onda entre 2e y 20e.

Fotografía 45. Horno para secado.



4.6 ANÁLISIS DE LOS DIFRACTOGRAMAS.

El fin de este análisis es determinar la composición y mineralización de las muestras de arcilla anteriormente procesadas. Al igual que el tipo arcillas y su contenido, (Figura 18).

El análisis consiste en un conteo semicuantitativo de los diferentes picos a través del difractograma picos que dependiendo de su valor de theta me representaran un

valor en grados amstrongs, valor que a su vez es equivalente a cada uno de los diferentes tipos de arcilla, encontrados en la muestra.

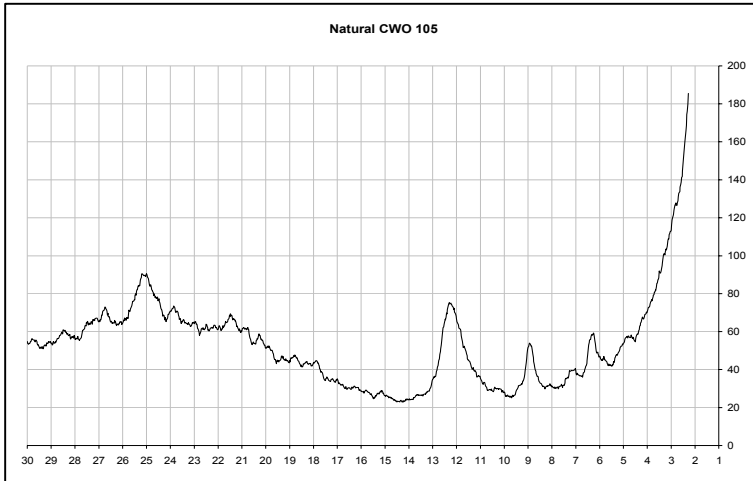
El conteo se hace desde una línea base o background, a partir del cual se mide la longitud máxima de cada pico.

El proceso exige comparar los picos de cada una de las arcillas detectadas en cada uno de los difractogramas (Natural, Etilenglicol y 500°) y ver como es su comportamiento a medida que va siendo sometida la muestra a los diferentes procesos en el laboratorio, (Figura 19).

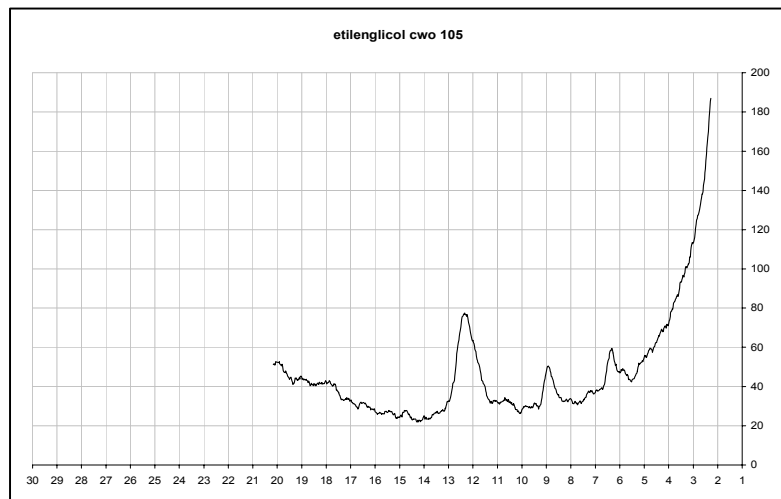
Comprendiendo de antemano el comportamiento esperado por cada tipo de arcillas al ser sometida a los diferentes tratamientos, se procede a medir y cuantificar cada unos de los picos en el difractograma de Etilenglicol, que es donde se puede apreciar las arcillas de tipo no expansivo en su magnitud real, con excepción de las arcillas expansivas como algunas esmectitas las cuales son medidas en el difractograma de Quemado de 500°.

Acto seguido se procede a llevar a porcentaje cada uno de las mediciones hechas para cada arcilla o pico; con excepción de aquellos picos que me representen las segundas reflexiones de un mismo tipo de arcilla, en el difractograma Natural. Los difractogramas analizados se presentan en este estudio como anexos. (Figura 20).

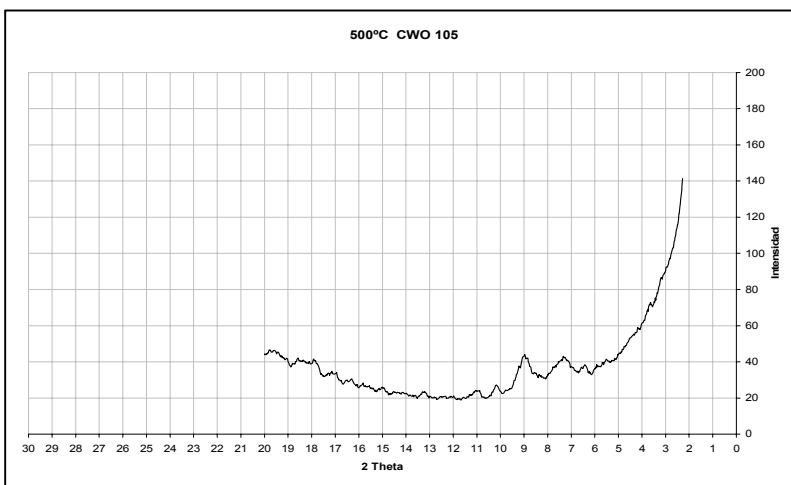
Figura 18. Difractogramas previos al análisis.



a- Natural

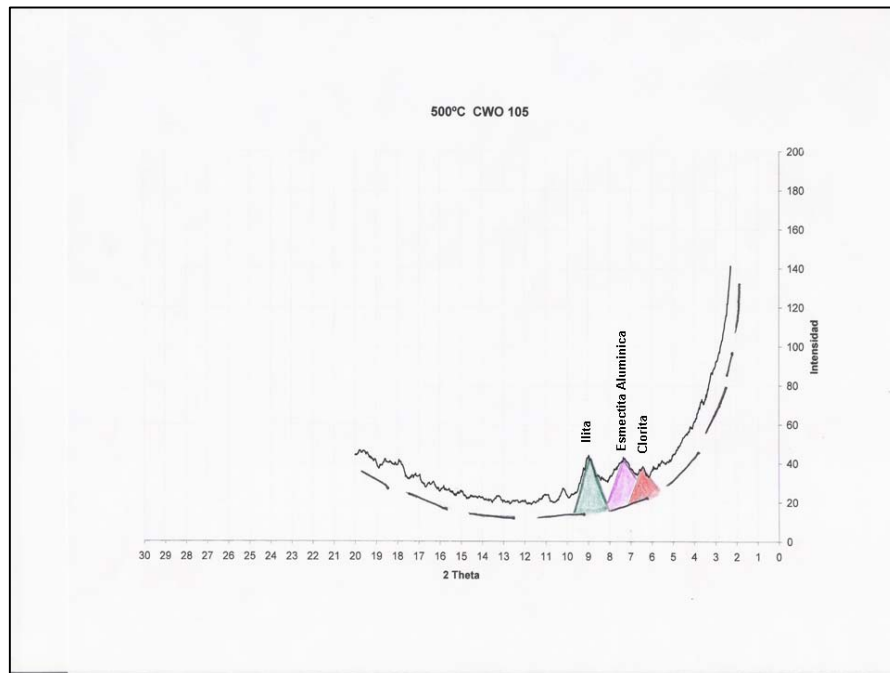


b- Etilenglicol

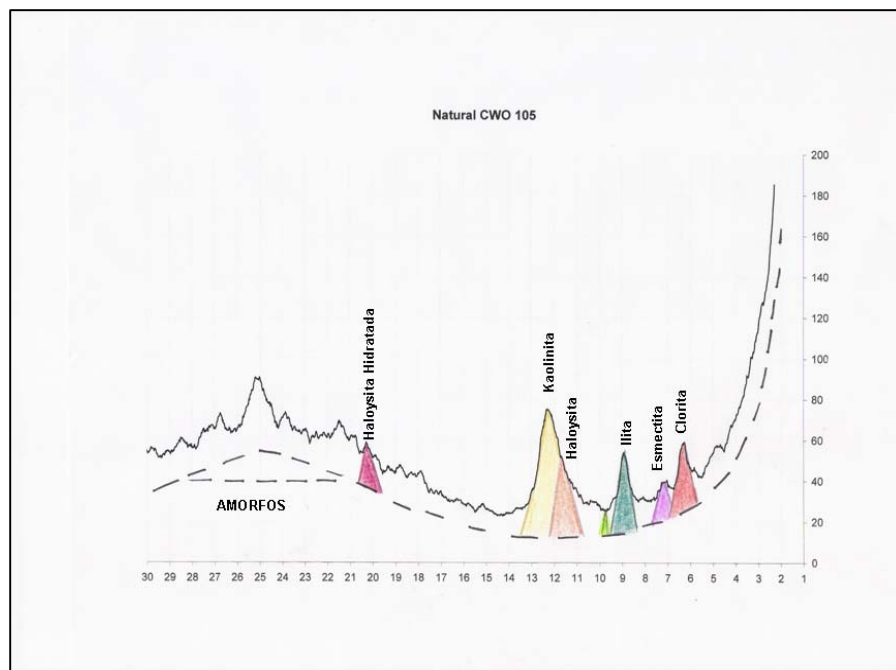


c- 500°

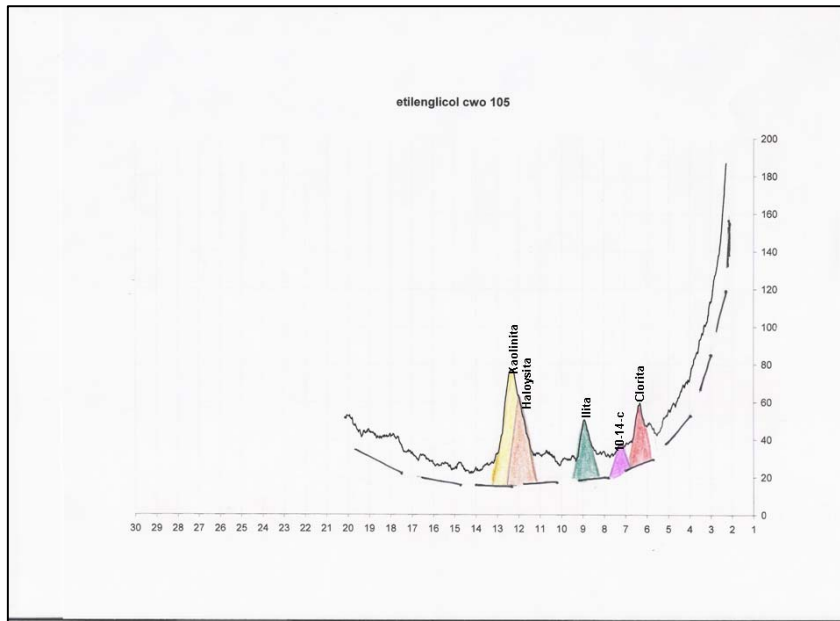
Figura 19. Difractogramas interpretados, identificación de minerales arcillas.



a- Difractograma interpretado, 500°.



b- Difractograma interpretado, Natural.



c- Difractograma interpretado, Etilenglicol.

Figura 20. Formato para la cuantificación de los minerales arcillosos.

FORMATO DESCRIPCIÓN DE MINERALES ARCILLOSOS "ZONA MACIZO DE SANTANDER"		
ILITA	16,52	%
ESMECTITA		%
HALOYSITA	27,83	%
KAOLINITA	29,56	%
CUARZO		%
CLORITA	14,78	%
TALCO		%
10-14-C	5,22	%
10-14-SM		%
INTERESTRATIFICADO		%
SM-ALUMINICA	6,09	%
		%
Observaciones		
Número de muestra:	CWO-105	
Ubicación de la Muestra	Plancha 121-I-C, Coordenadas X:1120233 Y:1268932	
Formación	Unidad Metamorfica del Neis de Bucaramanga	
Altura	2300 m.s.n.m aproximadamente	
Descripción de la muestra de mano	Material de color rojo, altamente meteorizado con textura lepidoblastica y un tamaño de grano de arena fina a muy fina	

PORCENTAJE DE MINERALES DE LA MUESTRA CWO-105	
ILITA	16,52
ESMECTITA	11,6
HALOYSITA	27,83
KAOLINITA	29,56
CUARZO	5,22
CLORITA	6,09
TALCO	
10-14-C	
SM-ALUMINICA	

4.7 RESULTADOS DE LA SEMICUANTIFICACION DE LOS MINERALES DE ARCILLA.

Los minerales de la arcilla son silicatos hidratados de aluminio o magnesio; puede tener cantidades variables de hierro, potasio, sodio y otros iones y su formación obedece a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neoformación y 3) por transformación. El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares. Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química entre varios componentes —o bien a partir de la arcilla original—, por lo que este tipo de formación requirió de mayor energía y de ciertas condiciones hidrotérmicas.

Para el caso del Macizo de Santander se tiene que los minerales arcillosos presentes, son resultado de procesos de neoformación, ya que proviene de la alteración que sufren los minerales presentes en las rocas cristalinas del área de estudio, donde impera la los procesos de alta meteorización dominante en zonas tropicales húmedas alrededor de todo el planeta.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la semicuantificación de los minerales arcilla(ver anexo I semicuantificación), las zonas 1 y 2 del mapa de meteorización (ver figura 10), se caracterizan por presentar Caolinita en un porcentaje que varía entre 18-45%, Illita 15-30%, Halloysita 15-30% y otros en menor proporción como Esmectita e Interestratificado.

Las zonas 3 y 4 del mapa de meteorización presentan los siguientes porcentajes de minerales arcilla como illita 15-40%, Esmectita 20-50%. Clorita 10-20% y Caolinita 15-30% e Interestratificado 15-30%.

Las zonas 5,6,7 y 8 dentro del mapa de meteorización presentan los siguientes minerales arcilla como caolinita 20-50%, Halloysita 20-30%, illita 20-40%, y minerales en menor proporción como lo son la Clorita, Interestratificado y Esmectita, los cuales no siempre están presentes en las muestras recolectadas.

La zona 9 dentro del mapa de meteorización presenta los siguientes minerales arcilla como Caolinita 30-40%, Halloysita 25-30%, Illita 15-20% y en menor proporción minerales como Clorita y Esmectita.

Derivado de lo anterior se puede ver un comportamiento homogéneo del porcentaje de la caolinita en gran parte de la cuenca del Río de Oro, debido a al alto porcentaje de feldespato presentes en las rocas cristalinas que al alterarse da como resultado la generación de este mineral de arcilla.

La parte central de la cuenca Río de Oro representada en las zonas de meteorización 5,6,7 y 8 se caracterizan por un alto contenido en minerales arcillosos como la Caolinita, Halloysita e Illita, ya que es allí donde se encuentra el mayor grado de meteorización de las rocas cristalinas gracias a las condiciones altas de humedad y vegetación al igual que la topografía (Pendientes medias -altas).

5. ANALISIS ESTRUCTURAL DE DIACLASAS Y ESTRÍAS

En el presente capítulo se realiza un análisis espacial de las diaclasas con el fin de encontrar su relación estructural con las fallas presentes en el área, además se calcula un valor aproximado de densidad de fracturas que permite visualizar el grado de fracturamiento presente.

Los datos que se procesaron fueron tomados directamente en la etapa de campo sobre los cuerpos ígneos, metamórficos y sedimentarios presentes en la zona de estudio, la cual se distribuyó en tres áreas de trabajo dependiendo de la ubicación de la misma y de las condiciones topográficas del área. Las zonas son categorizadas o divididas así:

Zona 1. Páramo de Berlín

Esta se encuentra ubicada en la parte alta del área de estudio, se caracteriza por una topografía suave de pendientes de 2-20° aproximadamente, esta limitada al noroeste por la divisoria de agua de la cuenca del Río Tona, al sur por la Loma Cruz de Piedra, al suroeste se encuentra limitada por las fallas Sevilla y Picacho. Corresponde a rocas cristalinas como la formación Silgara, Ortoneis de Berlín, Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y depósitos cuaternarios.

Zona 2. Alto El Picacho

Se encuentra ubicada en parte central de la zona de estudio, se caracteriza por una topografía de pendientes de 20-60° aproximadamente, se encuentra limitada al norte por el Alto El Picacho, al este se encuentra limitada por la falla Sevilla, al oeste se encuentra limitada por la Falla Picacho y al sur por la quebrada El Rasgón.

Este sector corresponde a rocas cristalinas como la Formación Silgara, Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, Ortoneis de Berlín y formaciones sedimentarias como lo son la Formación Tambor y Rosa Blanca. La zona se encuentra enmarcada por fallas de tipo normal como la Falla Picacho y Sevilla controlando los cauces de las quebradas dentro del sector, como lo son las quebradas Reventón, La Moza, Santa Rita y Picacho.

Zona 3. Sevilla-Piedecuesta

Se encuentra ubicada en la parte baja del área de estudio, se caracteriza por presentar una topografía abrupta de pendientes de 40-80° aproximadamente, se encuentra limitada al sur por la Falla Santa Marta Bucaramanga, al norte por la Falla Grandillos, al este por la Falla Sevilla y al oeste por la Falla Lato, corresponde a rocas cristalinas como lo son el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de la Corcova.

La zona presenta fallas de tipo normal e inverso como la Falla Sevilla, Lato, Bucaramanga-Santa Marta y Granadillos. La zona está caracterizada por un alto grado de fracturamiento de las rocas que la conforman.

Cada uno de los datos recolectados en estas zonas ya definidas son digitalizados en hojas de cálculo para un mejor manejo de la información. Estos datos posteriormente fueron procesados por medio del software TectonicsFp, el cual genera diagramas de rosetas (en donde se obtiene la dirección principal del rumbo), diagramas de polos y de contornos (en donde se observa la densidad de datos en una determinada dirección, y la dirección principal del buzamiento). Con estos datos se puede definir principalmente la dirección de flujo del agua dependiendo del grado de inclinación de los buzamientos; de tal forma que los buzamientos que muestren un rango entre 0 y 70° grados permitirán la interconexión entre las diaclasas y facilitaran el desplazamiento del agua a través del buzamiento de estas. De otro lado las diaclasas que muestren buzamientos mayores a 70° grados favorecerán el almacenamiento del recurso hídrico ya que la verticalidad de los buzamientos impide la interconexión de las diaclasas, razón por la cual la única dirección por la cual podría desplazarse el agua sería a través del rumbo de las diaclasas.

(Ver anexo, listado de tablas de las zonas de clasificación de diaclasas y mapa de distribución).

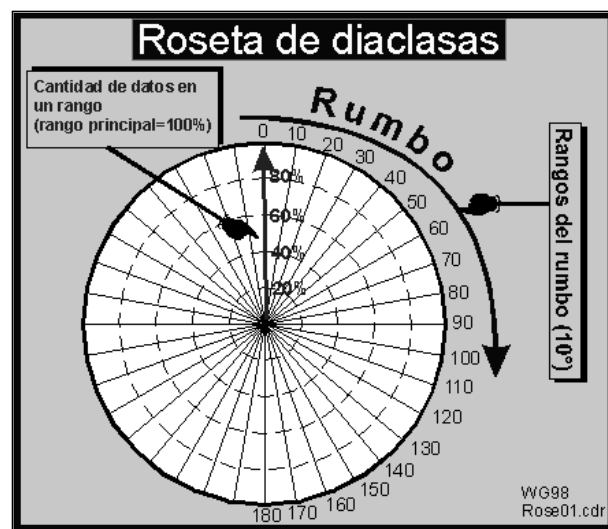
Para entender estos diagramas es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos:

5.1 DIAGRAMA DE ROSETAS.

Una roseta de diaclasas es un diagrama sencillo que permite visualizar las direcciones de los rumbos generales de estructuras tabulares (diques) y de planos

tectónicos (diaclasas, fallas). En este tipo de diagrama no hay información sobre la dirección de buzamiento. En conclusión, se puede describir este diagrama como un histograma redondo, lo cual significa que los rangos de rumbo se ubican al margen del círculo desde arriba (Norte o 0°), hacia abajo (Sur o 180°) en sentido de las manecillas del reloj. La cantidad de los datos con respecto de un rango se encuentran en el eje desde el centro (como 0%) hacia la margen (como 100%) (Figura 21). Solamente es necesario calcular la mitad de los rangos (medio círculo) porque el rumbo es un elemento bidireccional y automáticamente cubre el rango opuesto, es decir el rango de diferencia de 180° (lado opuesto) se marca igualmente.

Figura 21. Ilustración de un diagrama de Roseta



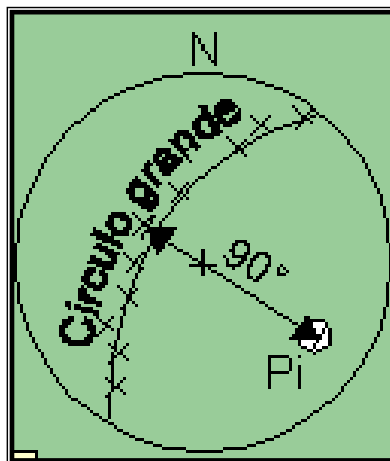
Fuente: Tomado de Departamento de Ingeniería de Minas, Área de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.

Para confeccionar una Roseta se necesita una base de datos tectónicos, (Mínimo 15 datos para que estadísticamente sea válido), los cuales se pueden presentar en tres tipos de notaciones. Existe además un software como el TectonicsFp empleado en este proyecto, que calcula y grafica las rosetas, sin embargo, es mejor verificar los resultados, teniendo en cuenta el tipo de notación que se introduce al computador.

5.2 DIAGRAMA DE POLOS

Una proyección estereográfica permite representar un plano inclinado. Para cada plano solo hay una perpendicular a él, llamado polo del plano que se puede representar mediante un punto, en una red estereográfica polar equiareal de Lambert-Schmidt (con graduación polar) (Figura 22). Ésta, permite contar la densidad de polos y está marcada en intervalos de 2° . Para utilizar esta plantilla, se empleó el Software TectonicsFp.

Figura 22. Representación de un polo.



Fuente: Tomado de Departamento de Ingeniería de Minas, Área de Geología, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.

En la mayoría de las proyecciones de cualquier tipo, el número de dimensiones de lo representado es siempre una dimensión menos. El hemisferio se reduce a un plano, un plano a una línea, y una línea a un punto. Otra ventaja de esta proyección en particular es que un plano se puede representar mediante un punto, lo que reduce a otra dimensión menos los valores de lo representado.

Para visualizarla, se coloca la mano izquierda extendida, con la palma hacia arriba y los dedos apuntando al N, sosteniendo un lápiz entre los dedos de modo que sea perpendicular al plano de la mano.

El lápiz pinchará el hemisferio inferior en un punto del cuadrante noroeste. Este punto siempre está a 90° del plano; por consiguiente, desde la traza del círculo lo máximo que se cuentan son 90° , de derecha a izquierda, a lo largo del diámetro Este-Oeste y se marca P, que es la proyección del polo del plano.

La línea que constituye el polo se proyecta como un punto; este punto, por lo tanto representa el plano. Cualquier estructura lineal se puede representar análogamente por una proyección directa, pero para representar un plano se emplea un polo, éste es una proyección recíproca.

5.3 ANALISIS DE DIACLASAS

Zona 1 Páramo de Berlín.

Figura 23. Diagrama de Rosetas, Sector Páramo de Berlín

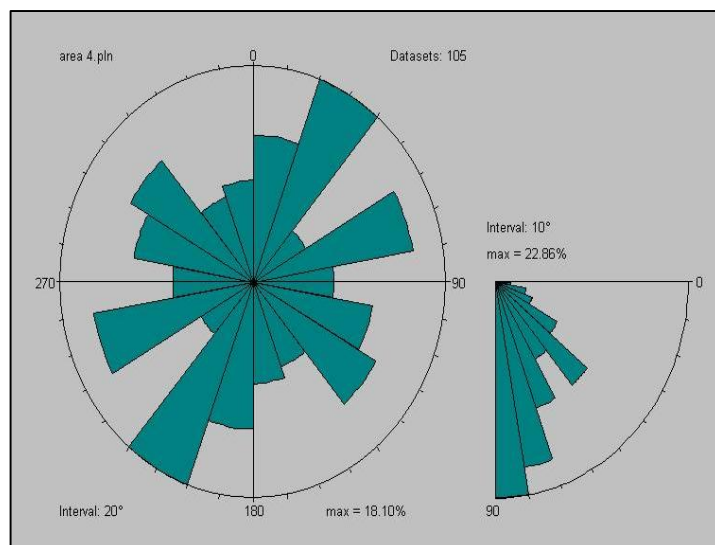


Figura 24. Diagrama de polos, Zona Páramo de Berlín

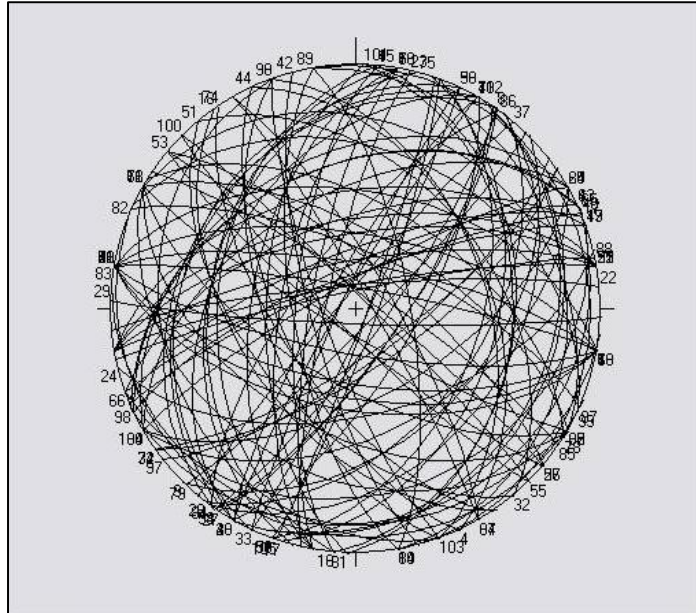
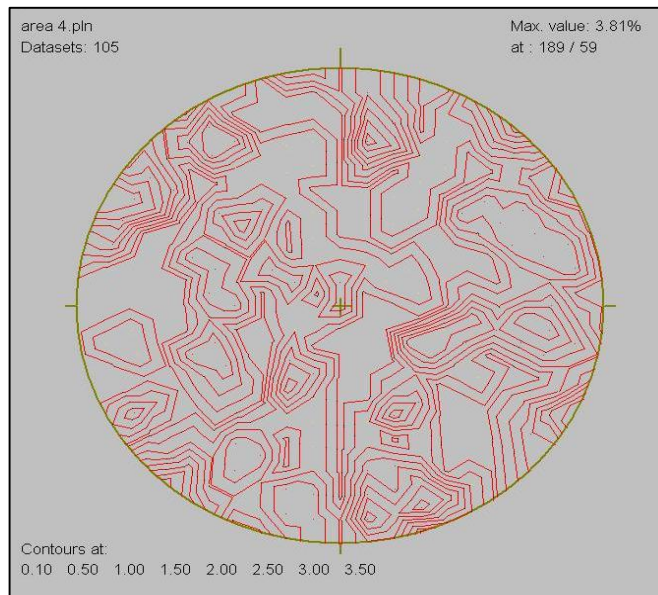


Figura 25. Diagrama de Contornos, Zona Páramo de Berlín



El diagrama de rosetas indica una dirección preferencial de las diaclasas NE-SW. El diagrama muestra también la inclinación de los buzamientos de las diaclasas, definiendo el rango entre 80 y 90° como el principal, indicando que el 22.86% de las diaclasas presentan estas características. La verticalidad de los buzamientos de estas diaclasas supone que la zona analizada favorece el almacenamiento de agua, ya que estas diaclasas no presentan interconexión en profundidad, impidiendo de esta forma la migración del recurso hídrico. El diagrama de contornos indica que la diaclasa medida con mayor frecuencia tiene un rumbo de 189° y un buzamiento de 59°. Este valor de rumbo coincide con la dirección de rumbo que impera en la zona. El valor de buzamiento indica una orientación hacia el SW, sin embargo debido a su verticalidad favorecerá principalmente el almacenamiento y no la migración, la cual, si se presentara sería en dirección del rumbo.

Zona 2 Alto El Picacho

Figura 26. Diagrama de Rosetas, Zona Alto El Picacho

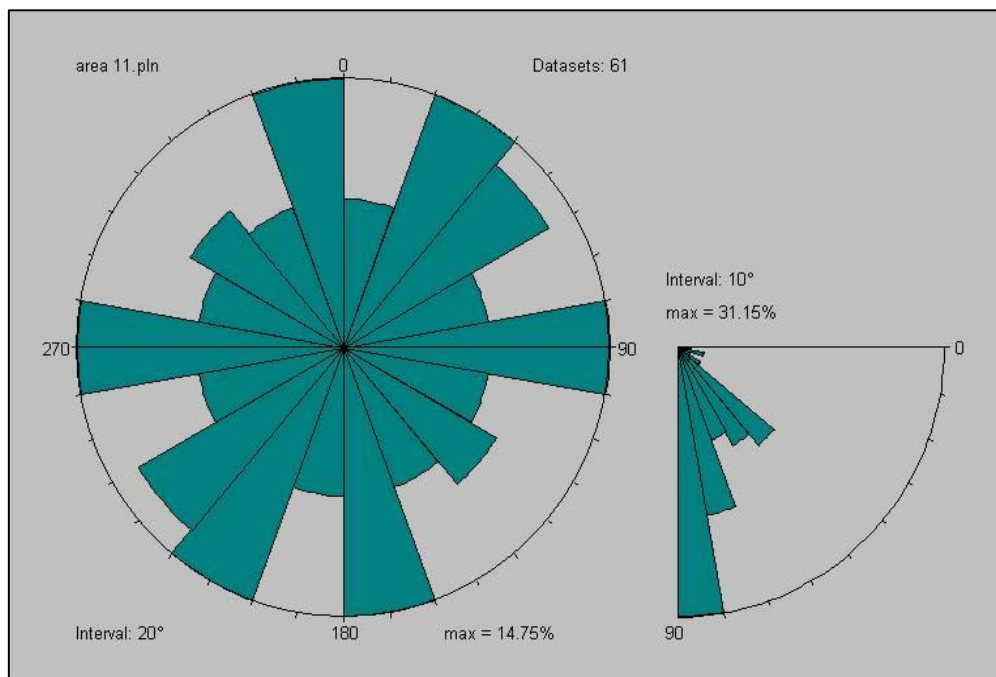


Figura 27. Diagrama de Polos, Zona Alto El Picacho

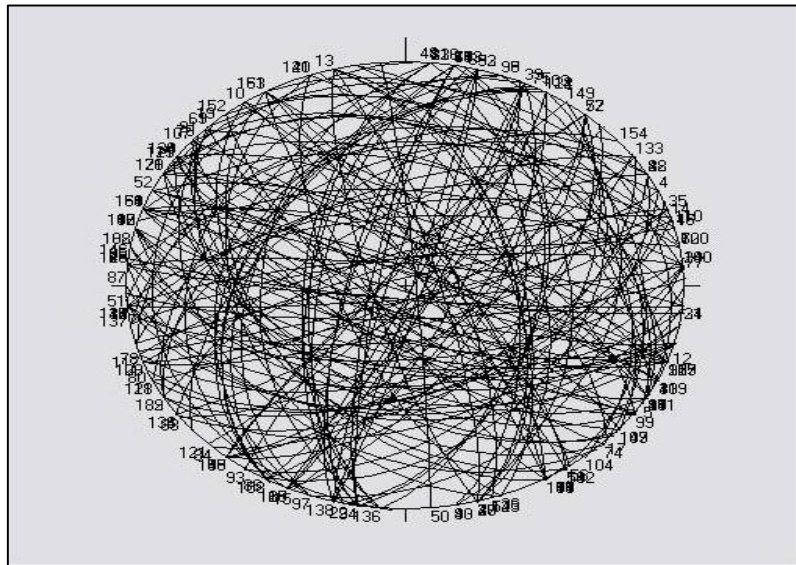
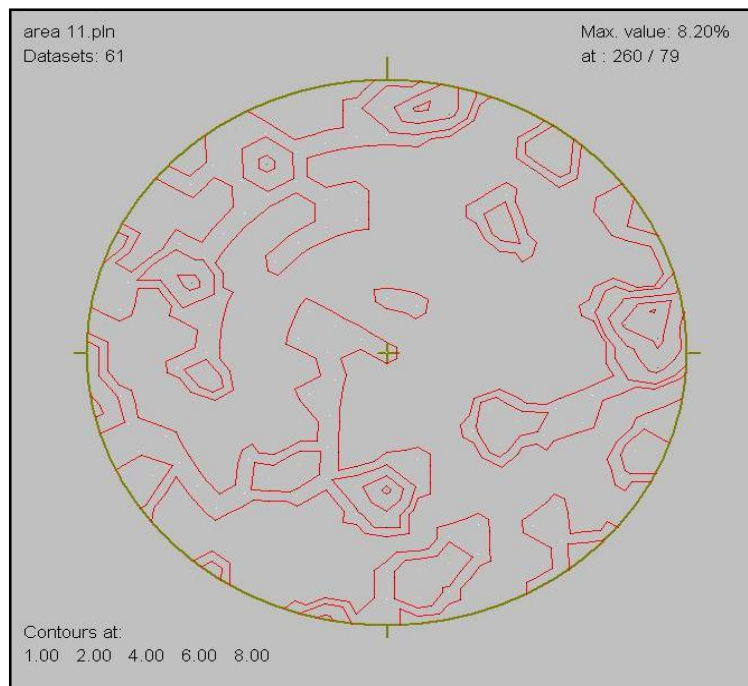


Figura 28. Diagrama de Contornos, Zona Alto El picacho



Según el análisis estadístico en este sector las diaclasas presentan tres orientaciones principales en el diagrama de rosetas. La primera de estas direcciones es NNW-SSE, la segunda es NE-SW y la última tiene una dirección E-W. Lo anterior evidencia la complejidad estructural de la zona del Picacho. Las diaclasas de este sector muestran una inclinación preferencial que oscila entre 80 y 90°, favoreciendo de esta manera el almacenamiento de agua en la zona. Las diaclasas que presenta este comportamiento vertical corresponden al 31.15% de las diaclasas medidas en la zona. El diagrama de contornos muestra que las diaclasas presentes en esta zona tienen un rumbo preferencial de 260° y un buzamiento de 79° al NW, lo anterior indica que el juego de las diaclasas con estos datos está relacionado con la tercera dirección preferencial. Por lo tanto las diaclasas permitirán el almacenamiento de agua en el sector donde mayor sea su densidad.

Zona 3 Sevilla-Piedecuesta.

Figura 29. Diagrama de Rosetas, Zona Sevilla Piedecuesta

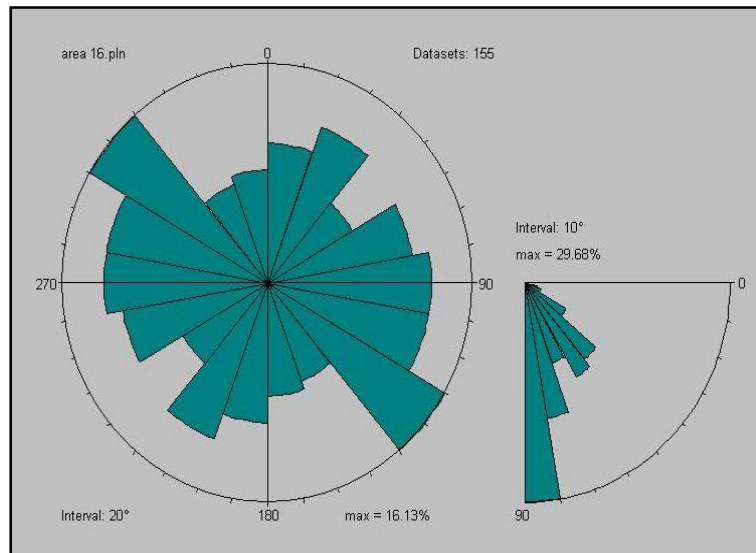


Figura 30. Diagrama de polos, Zona Sevilla- Piedecuesta

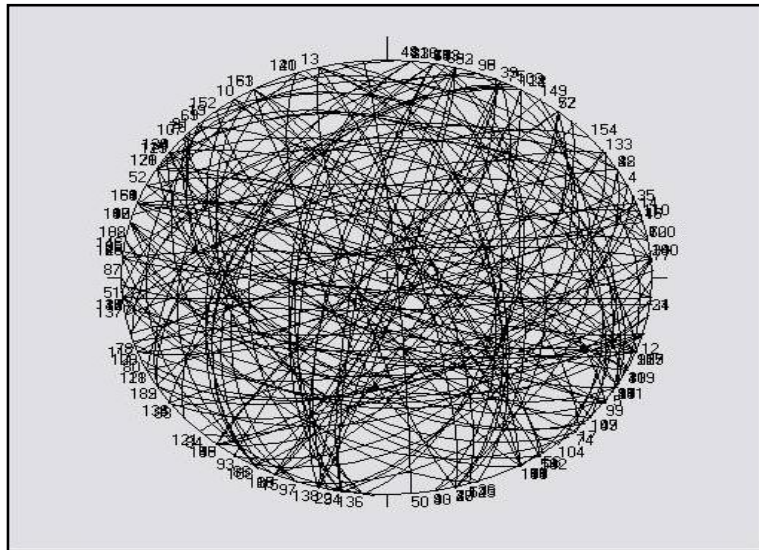
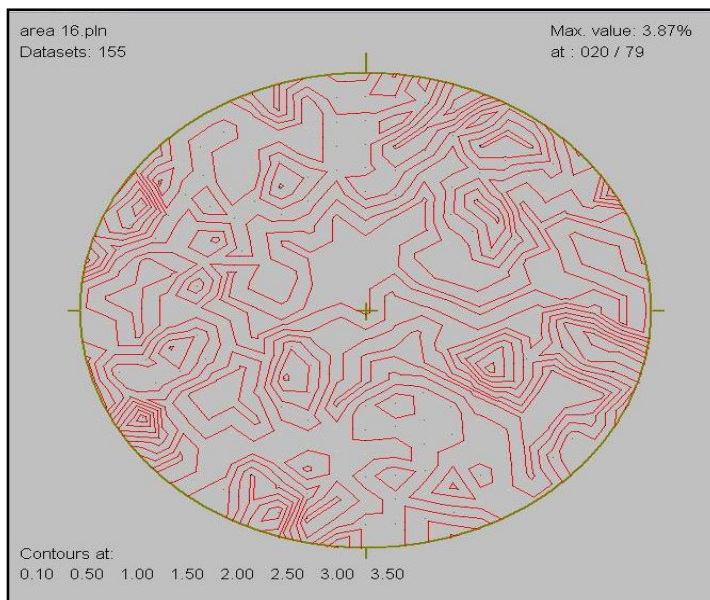


Figura 31. Diagrama de Contornos, Zona Sevilla-Piedecuesta



En esta zona a partir de los diagramas registrados por el software se puede apreciar que las diaclasas presentan una dirección principal NW-SE. Según el diagrama de rosetas estas diaclasas son verticales, ya que tienen una inclinación de buzamiento que varía entre 80 y 90°, lo cual indica que existe recarga del agua más no flujo, ya que estas diaclasas no presentan interconexión a profundidad. Si existiera flujo este se daría por la dirección de rumbo de las diaclasas. Pero debido a que un buen porcentaje de las diaclasas son verticales (29.68%), el flujo del agua sería muy poco. El diagrama de contornos para esta zona indica que la dirección preferencial de rumbo para las diaclasas es de 20° y un buzamiento preferencial de 79° al SE. El conjunto de diaclasas relacionado con estos datos muestra que la mayoría de estas favorecen la recarga de agua.

Análisis total de diaclasas de la Cuenca Río de Oro

Figura 32. Diagrama de Rosetas, Cuenca total del Río de Oro

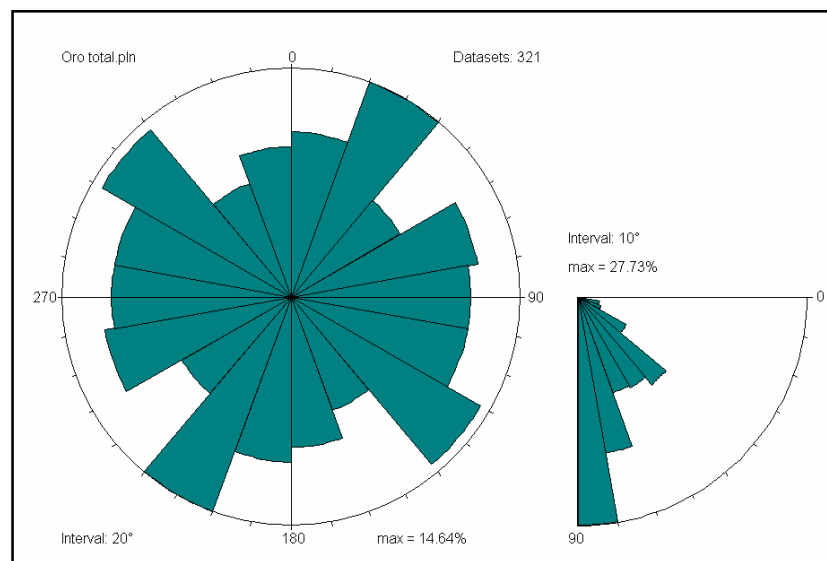


Figura 33. Diagrama de Polos. Cuenca total del Río de Oro

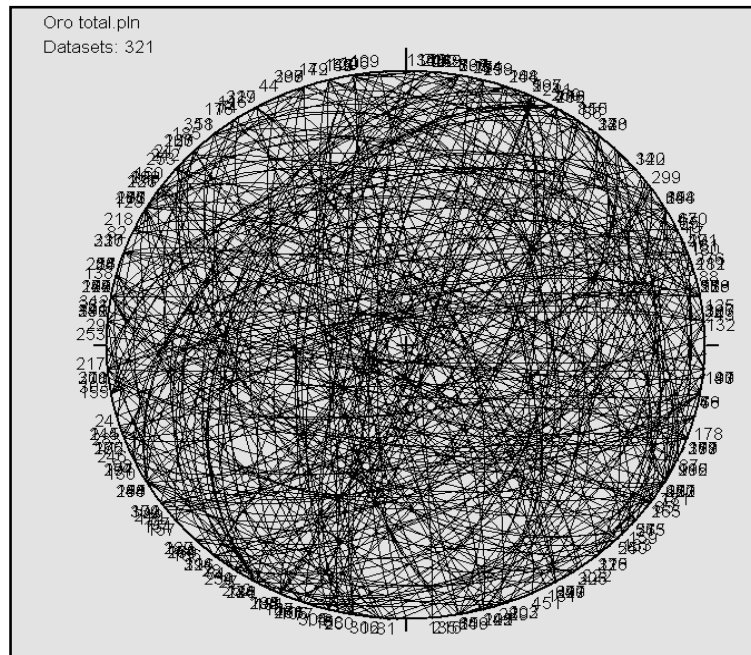
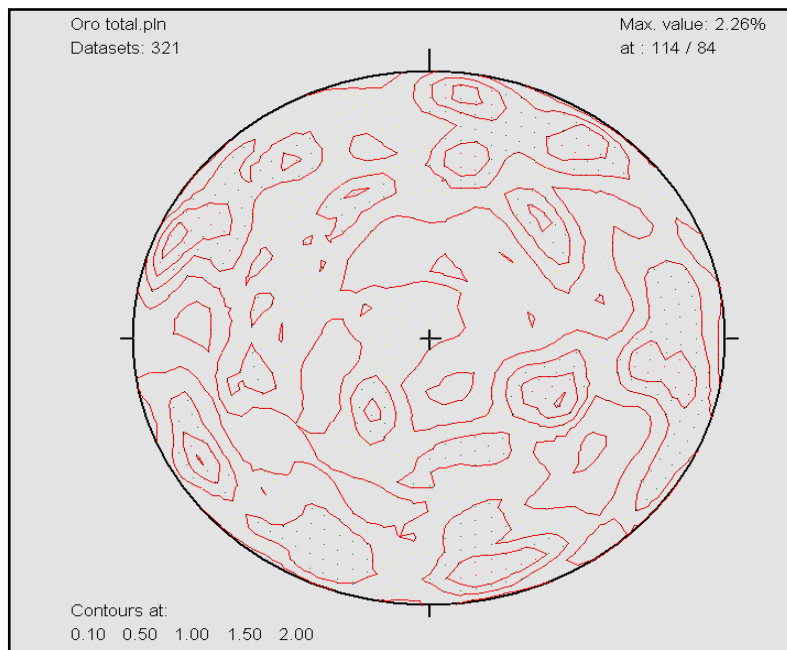


Figura 34. Diagrama de Contornos. Cuenca Total del Río de Oro

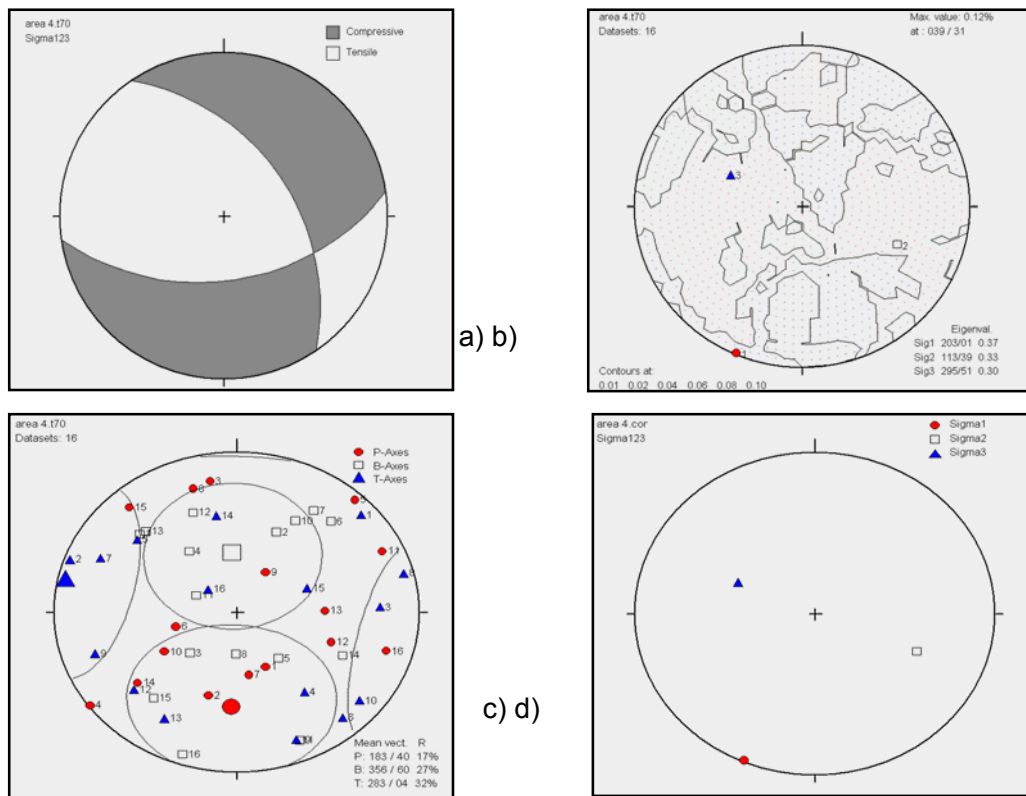


Según el análisis estadístico para la zona total de la cuenca del Río de Oro las diaclasas presentan dos orientaciones principales en el diagrama de rosetas. La principal de estas direcciones es NE-SW, la segunda es NW-SE. Lo anterior evidencia la complejidad estructural de la cuenca del Río de Oro. Las diaclasas de la zona de estudio muestran una inclinación preferencial que oscila entre 80 y 90°, favoreciendo de esta manera el almacenamiento de agua en la cuenca. Las diaclasas que presenta este comportamiento vertical corresponden al 27.73% de las diaclasas medidas en la zona. El diagrama de contornos muestra que las diaclasas presentes en esta zona tienen un rumbo preferencial de 114° y un buzamiento de 84° al SW. Según el análisis total de la zona las diaclasas permitirán el almacenamiento de agua, mas no la migración.

5.4 ANALISIS DE ESTRIA

Zona 1 Páramo de Berlín

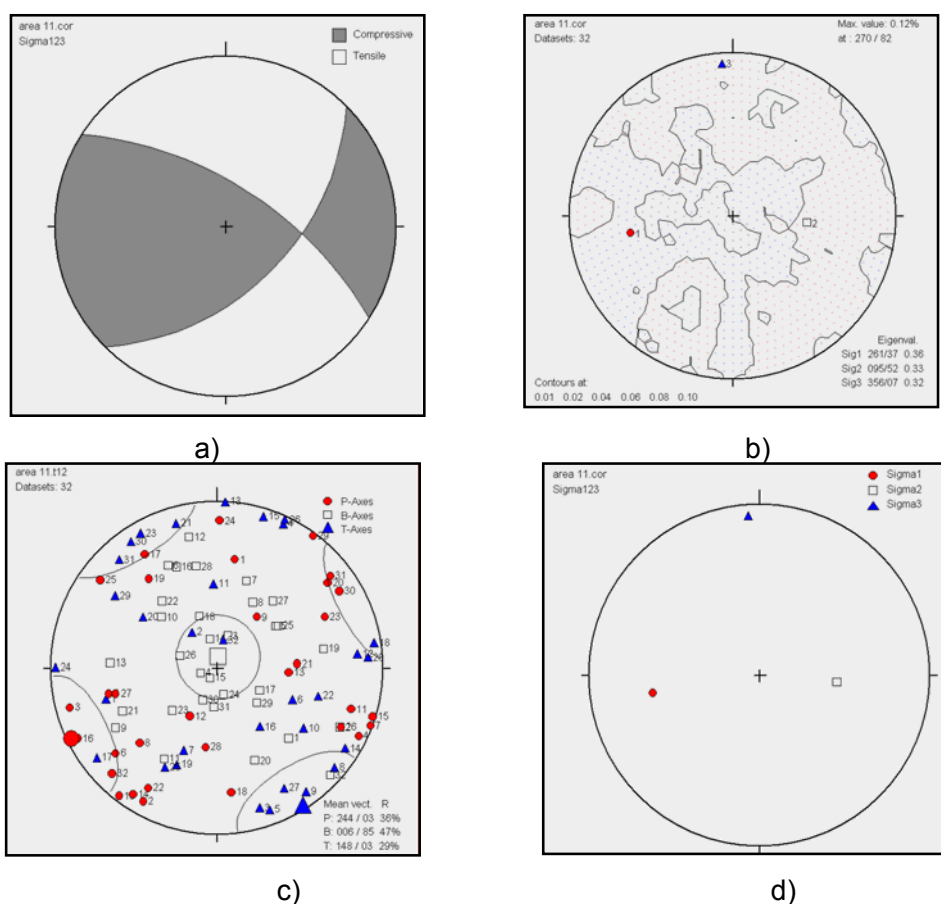
Figura 35. Gráficas originas para la zona de Páramo de Berlín. a) Diagrama de Esfuerzo – Método del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos



Para el sector del altiplano de Berlín, se obtiene un tensor de esfuerzos compuesto por un esfuerzo horizontal principal σ_1 203/01 \pm 0.37, un esfuerzo subhorizontal intermedio σ_2 113/39 \pm 0.33 y un esfuerzo subvertical mínimo σ_3 295/51 \pm 0.30. El mejor ajuste de los ejes de presión (P) y tensión (T) se encuentra con un ángulo θ de 70°, el cual corresponde al ángulo entre el plano de estría y el eje principal de esfuerzo σ_1 . El eje P tiene una orientación de 183/40 con un factor de correlación R= 17%, el eje T se orienta 283/04 con R= 32%, y el eje B se orienta a 356/60 con R=27%. La correlación entre los valores de estría y el campo de esfuerzos muestra un movimiento principal inverso con componente de rumbo.

Zona 2 Alto El Picacho

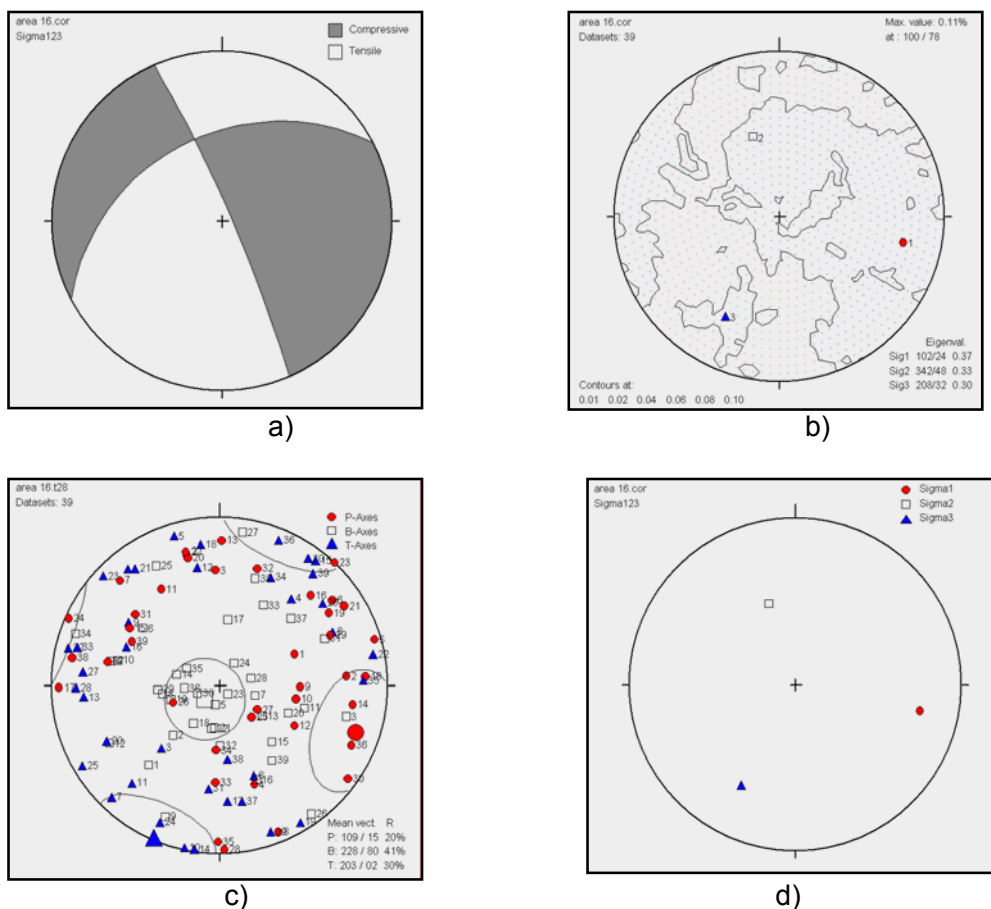
Figura 36. Graficas originas para la zona de Alto El Picacho. a) Diagrama de Esfuerzo – Metodo del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos.



Para el sector del Alto El Picacho, se obtiene un tensor de esfuerzos compuesto por un esfuerzo subhorizontal principal σ_1 261/37 \pm 0.36, un esfuerzo subvertical intermedio σ_2 095/52 \pm 0.33 y un esfuerzo horizontal mínimo σ_3 356/07 \pm 0.32. El mejor ajuste de los ejes de presión (P) y tensión (T) se encuentra con un ángulo θ de 12°, el cual corresponde al ángulo entre el plano de estría y el eje principal de esfuerzo σ_1 . El eje P tiene una orientación de 244/03 con un factor de correlación R= 36%, el eje T se orienta 148/03 con R= 29%, y el eje B se orienta a 006/85 con R=47%. La correlación entre los valores de estría y el campo de esfuerzos muestra un movimiento principal normal con componente de rumbo.

Zona 3 Sevilla-Piedecuesta.

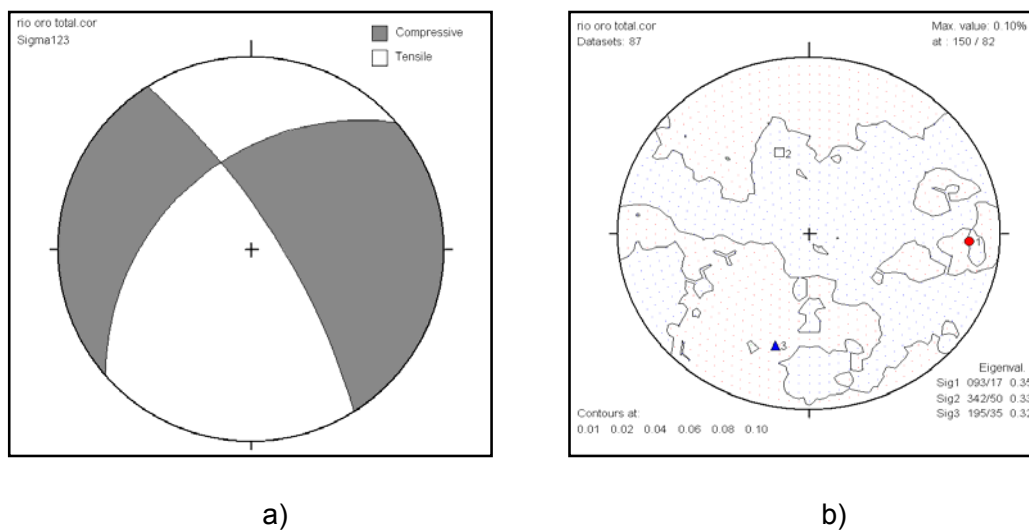
Figura 37. Gráficas originas para la zona de Sevilla-Piedecuesta. a) Diagrama de Esfuerzo – Método del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos

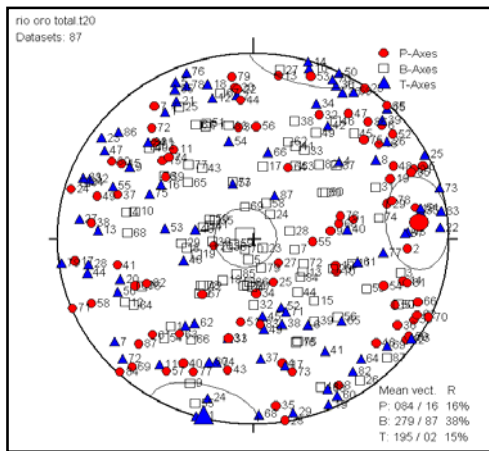


Para el sector de Sevilla-Piedecuesta, se obtiene un tensor de esfuerzos compuesto por un esfuerzo subhorizontal principal σ_1 102/24 \pm 0.37, un esfuerzo subvertical intermedio σ_2 342/48 \pm 0.33 y un esfuerzo subhorizontal mínimo σ_3 208/32 \pm 0.30. El mejor ajuste de los ejes de presión (P) y tensión (T) se encuentra con un ángulo θ de 28°, el cual corresponde al ángulo entre el plano de estría y el eje principal de esfuerzo σ_1 . El eje P tiene una orientación de 109/15 con un factor de correlación R= 20%, el eje T se orienta 203/02 con R= 30%, y el eje B se orienta a 228/80 con R=41%. La correlación entre los valores de estría y el campo de esfuerzos muestra un movimiento principal de rumbo.

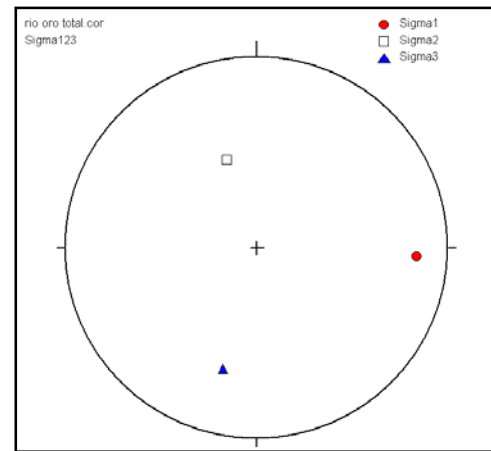
Análisis de estrías total de la Cuenca de Río de Oro

Figura 38. Gráficas originas para la zona total Cuenca del Río de Oro. a) Diagrama de Esfuerzo – Método del diedro recto; b) Diagrama de contornos; c) Diagrama de Ejes P-T d) Diagrama de tensor de esfuerzos





c)



d)

En la cuenca de río de oro, se obtiene un tensor de esfuerzos compuesto por un esfuerzo horizontal principal σ_1 $093/17 \pm 0.35$, un esfuerzo subvertical intermedio σ_2 $342/50 \pm 0.33$ y un esfuerzo subhorizontal mínimo σ_3 $195/35 \pm 0.32$. El mejor ajuste de los ejes de presión (P) y tensión (T) se encuentra con un ángulo θ de 20° , el cual corresponde al ángulo entre el plano de estría y el eje principal de esfuerzo σ_1 . El eje P tiene una orientación de $084/16$ con un factor de correlación $R= 16\%$, el eje T se orienta $279/87$ con $R= 38\%$, y el eje B se orienta a $195/02$ con $R=15\%$. La correlación entre los valores de estría y el campo de esfuerzos muestra un movimiento transpresivo.

6. CONCLUSIONES

Al comparar la cartografía existente, definida a una escala de 1: 100.000 por INGEOMINAS, a una escala 1: 25000; se redefinieron contactos de las diferentes formaciones, fallas, pliegues al igual que depósitos reciente según su génesis.

El estudio cartográfico geológico a escala 1: 25000 de las planchas 110-III-C, 120-II-D, 121-I-A, 120-II-B Y 121-I-C, permite identificar las siguientes unidades (registro que abarca unidades del precámbrico y unidades Triásico-Jurásicas al igual que depósitos recientes), a) Unidad del Neis de Bucaramanga (**peb**), compuesto de material cuarzofeldespático y biotítico, proveniente del metamorfismo de rocas sedimentarias; b) Unidad del Silgara (**pDs**), compuesto por material esquistos micáceos de origen sedimentario; c) Ortoneis de Berlín (**pDo**), resultado de del metamorfismo de rocas ígneas; d) Cuarzomonzonita de la Corcova (**JrcI**), e) Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (**Jrcs**) f) Formación Girón; (**Jg**), g) Formación Tambor (**Kita**); h) Formación Rosa Blanca (**Kir**).

Debido a la alta complejidad estructural de la zona de trabajo al igual que en todo el Macizo Santandereano, no se define un comportamiento secuencial de las unidades, en lugar de esto, encontramos una cuenca que se constituye como un sistema de bloques donde se enfrentan diversas litologías en un mismo punto.

Todos los cuerpos de roca presentes en la zona de estudio fueron evaluados en su aspecto hidrogeológico encontrándose que la mayoría de ellos presentan porosidad secundaria debido al diaclasamiento. Además todas las unidades que afloran en la zona de estudio fueron descritos macroscópicamente, definiendo aspectos texturales, estructurales y composicionales. Lo anterior fue agrupado en un catalogo de muestras que se entrega como anexo

Por medio de los sensores remotos y modelo digital de elevaciones se definió drenajes, lineamientos y fallas presentes en la zona de trabajo. Se encontró que la dirección preferencial de estas estructuras es NW-SE, dirección que favorece el flujo de agua desde la zona de recarga (Páramo de Berlín) hacia el área metropolitana de Bucaramanga.

Debido al gran contraste de pendiente, climas, tipo de vegetación y precipitación de la zona de trabajo, se logra identificar y delimitar zonas de meteorización, gracias a estas características, al igual que un reconocimiento de la zona en campo.

Se definieron nueve zonas de meteorización en el área de estudio, las cuales fueron caracterizadas físicamente en el campo. Se encontró que cuatro de estas zonas tienen un alto grado de meteorización, tres poseen un grado de meteorización media y las dos restantes poseen un bajo grado de meteorización. La zona que tiene el mayor grado de alteración corresponde a la Formación Silgará que presenta un alto porcentaje de minerales arcillosos en sus perfiles de meteorización.

Las zonas 5-6-7-8-9 dentro del mapa de meteorización, son las que presentan mayor grado de meteorización e interés como zonas de recarga de acuíferos y generador de fuentes hídricas, gracias a sus características físicas.

Se elaboró un mapa Geológico y estructural donde se muestran las principales fallas y lineamientos presentes en la zona de trabajo.

Se realizó una base de datos de diaclasas para el área de estudio. Además se creó también una base de datos con estrías, las cuales son muy importantes a la hora de definir fallas y su respectivo comportamiento.

Mediante el análisis estadístico de las diaclasas se encontró que estas tienen un alto grado de inclinación de buzamiento lo que indica que el agua puede almacenarse; además se encontraron que las condiciones de flujo no son las mejores debido a que la verticalidad de las diaclasas no favorece la interconexión de estas a profundidad.

En general todas las fallas ya sean de tipo regional o local, se comportan como rutas preferenciales de movimiento del agua; y además como zonas de percolación.

7. RECOMENDACIONES

Con el fin de definir zonas más propicias para la filtración y almacenamiento de agua, se recomienda la realización de secciones delgadas para caracterizar los tipos de porosidad a nivel microscópico de las diferentes unidades aflorantes.

Realizar una cartografía a una escala menor dentro de las zonas de mayor grado meteorización identificada en la fase de campo con el propósito de caracterizar y redefinir estas zonas de una forma más precisa.

La realización de sondeos eléctricos verticales para la cuantificación de espesores de los depósitos recientes al igual que el comportamiento de algunas estructuras del subsuelo.

Perforación de pozos para obtener datos litológicos, estructurales e hidrogeológicos en profundidad en el área de estudio y determinar espesores de los diferentes cuerpos meteorizados.

Continuar con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología propuesta aplicada en este trabajo, con el fin de caracterizar con mayor detalle las zonas de meteorización propuestas en este proyecto, por medio del estudio de minerales de fracción arcilla.

Aplicar postratamiento a las muestras de interés identificadas en las diferentes zonas de trabajo con el fin de mejorar estos resultados y poder los aplicar a fines hidrogeológicos.

BIBLIOGRAFIA

Análisis facial del inicio del avance marino del Cretácico en la región SW del Macizo de Santander. V Congreso Colombiano de Geología. Guía de Excursión Técnica, Bucaramanga. 1989. 41 p.

APAZA, DIMAS et al. Explotación de acuíferos fisurados del valle Cusco, mediante galerías filtrantes, para abastecimiento poblacional. En Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. (4º:199: Montevideo). Ponencias del IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Montevideo. 1998. 621-637 p.

ARAUJO CORTEZ, OSCAR D. Caracterización litológica de los pozos perforados en el sector de Pan de Azúcar y Albania para establecer un modelo interpretativo hidrogeológico en las rocas cristalinas fracturadas del Macizo de Santander en el sector ESE de Bucaramanga-Santander, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2004. 10-36 p.

BELTRAN, R. y REY A. Comportamiento Estructural Asociado Al Sistema De Fallas Bucaramanga - Santa Marta Y Diaclasas, Para Definir Una Red De Drenaje Subterráneo En El Macizo De Santander, Sección Entre Piedecuesta (Río De Oro) Y Bucaramanga (Río Surata). Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología. Bucaramanga. 2002

BOINET, T., et al, Le Poicon de Pamplona (Colombie): Un jalon de la frontiere meridionale de la plaque Caraibe. Societe Geologique France. Bol. 8, I (3), París. 1985. 403 –413 p.

BOINET, T., et al. La Falla de Bucaramanga (Colombia), su función durante la Orogenia Andina. Geología Norandina. Bogotá. 1989. (11): 3-10 p.

CARREÑO, et al. Influencia de la Estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V. 22, Número 1. México D.F. 2005

CLAVIJO, J Y ROYERO, J. Mapa Geológico Generalizado Departamento De Santander, Memoria Explicativa, Escala 1:100.000. Instituto De Investigación E

Información Geocientífica, Minero-Ambiental Y Nuclear. Ingeominas, República De Colombia. 2001

COMPTON, ROBERT. Geología de Campo. Jhon Wiley & Sons, Inc; 1970, México D.F.

Consideraciones sobre la importancia de la paleogeografía y las áreas de aporte precretácicas en la prospección de hidrocarburos en el Valle Superior del Magdalena, Colombia. Geología Colombiana, (14) Bogotá.

CORPLAN CORPORACIÓN METROPOLITANA DE PLANEACIÓN Y DESARROLLO DE BUCARAMANGA. Situación Actual y Futuro Inmediato del Área Metropolitana de Bucaramanga: Subsistema Biofísico – Ambiental. Bucaramanga. 2000.

DE ARAÚJO, C., Y AMAMOTO J, MADRUCCI V. Análise Morfoestrutural Em Área De Ocorrência De Arenito Asfáltico, Bacia Do Paraná, São Paulo, Revista do Instituto Geológico. São Paulo. 2003. 24(1/2), 25-41 p.

DE PORTA, J. Léxico estratigráfico. 1974.

DEL TORO, WILFREDO. Aspectos Geotécnicos de los sectores inestables de la micro cuenca de Río Sucio parte alta de la cuenca del río Tona en el departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1997.

ESTRADA, A. Geology and plate tectonics history of the Colombian Andes. M.Sc. Thesis (inédita), Stanford University, Stanford. 1972. 115 p.

ETAYO, F. et al. Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, Bogotá. 1983. (14-I): 1-235 p.

FABRE, A., La subsidencia de la Cuenca del Cocuy, Cordillera Oriental de Colombia durante el Cretácico y Terciario. Geología Norandina, Bogotá. 1983. (8): 21-27, 49-61 p.

GARCIA, C Y CAMPOS, N. Composición Química y mineralógica de las biotitas metamórficas del sector central del macizo central de del macizo de Santander, Colombia. Boletín de Geología UIS, Vol. 22, N°37, Bucaramanga, 2000. 18-27 p.

GARCIA, C Y URIBE, E. Los Delirios: un Yacimiento Hidrotermal de oro y plata en la región de Vetas, Santander. Colombia. Boletín de Geología UIS, Vol. 25, N° 40 Bucaramanga. 2003. 91-103 p.

GARCIA, C. Manual de Laboratorio de Petrología Metamórfica. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología. Bucaramanga. 1997.

GARCIA, C. Y RIOS, C. Metamorfismo y Metalogenia Asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Informe Final Proyecto de investigación 1102-05-083-95 Conciencias- Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1999. 191p.

GOLDSMITH, R., et al. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper Washington. 1971. (750): 44-49 p.

GOMEZ, L. Y SANTANA, H. Geología, geomorfología y geoquímica de los procesos de inestabilidad de la zona del Tembladal, municipio de Tona, Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1995.

GONZALEZ, G Y QUINTERO, M. Patrones De Fracturamiento Asociado A La Falla De Bucaramanga Sector Piedecuesta-Río Surata. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1990.

GONZÁLEZ, H., NÚÑEZ, A. Y PARÍS, G. Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1'500.000. Ingeominas. Memoria Explicativa, Bogotá., 1998. 71 p.

GUTIÉRREZ E., Y MATERÓN M. Modelación De Acuíferos Para El Aprovechamiento Sostenible Del Agua Subterránea. Universidad Nacional de Colombia. 2000

HERNÁNDEZ, WILLIAM. Análisis de las influencias de los factores geomorfológicos en los procesos erosivos de la micro cuenca de la quebrada Río Sucio parte alta del río Tona. Universidad Industrial de Santander. 2001

IRVING, E.M. (1971). La evolución estructural de los Andes más septentrionales de Colombia. Ingeominas. Boletín Geológico, 19 (2): 1-89. Bogotá.

ISAZA, O. Estimación de la recarga mensual en la cuenca del río de Oro por medio de un modelo geológico distribuido. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2004. 5 – 12 p.

JORDAN, G., MEIJNINGER B., VAN HINSBERGEN, D., MEULENKAMP, J., VAN DIJK. Extraction of morphotectonics features from DEM's: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece. International journal of applied earth observations and geoinformation. V 6. Holanda., 2005. 163 – 182 p. Issue 3.

KIRSCHBAUM AL, MARTÍNEZ E, PETTINARI G, HERRERO S. Weathering profiles in granites, Sierra Norte (Córdoba, Argentina), Journal of South American Earth Sciences, 2005. 19 479–493 p.

KRÁSNÝ J. Distribución Espacial De Los Parámetros Hidráulicos En Medios Hidrogeológicos Diferentes, Groundwater and human development. 2002.

KROONENBERG, S. Litología, metamorfismo y origen de las granulitas del Macizo de Garzón, Cordillera Oriental (Colombia). Geología Norandina, Bogotá, 1982. (6): 39-46 p.

KROONENBERG, S. Litología, metamorfismo y origen de las granulitas del Macizo de Garzón, Cordillera Oriental (Colombia). Geología Norandina, Bogotá. 1982. (6): 39-46 p.

MACÍA, C., MOJICA, J. Y COLMENARES, F. Consideraciones sobre la importancia de la paleogeografía y las áreas de aporte precretácicas en la prospección. 1985.

MANTILLA, LUIS C. Guia de Laboratorios de Petrología Ignea. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga. 2003.

MAPINGENIERIA CIA. LTDA. Estudio De Sedimentos Para La Cuenca Superior Del Río Tona (Carrizal). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Modelo de bloques de deformación actual para Colombia. INGEOMINAS. Bogotá, 2003. 30 – 46 p.

MENDOZA, C., y SANDOVAL, R. Un Estudio de Oferta Hídrica en la Cuenca Superior del Río Lebrija. 78 p. Proyecto de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil; Bucaramanga. 2002

MOJICA, J. Y FRANCO, R. Estructura y evolución tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. Universidad Nacional de Colombia. Geología Colombiana, Bogotá, 1992. (17): 41-64 p.

MOJICA, J. Y HERRERA, A. Estratigrafía, facies y direcciones de aporte de la Formación Luisa en la región de Rovira, Tolima. Universidad Nacional de Colombia. Geología Colombiana, Bogotá. 1986. (15): 65-80 p.

MONTAÑO J, DA ROSA F Y Hindi E. Evaluación De La Vulnerabilidad En Sistemas Fisurados, Revista Latino-Americana de Hidrogeología, No. 2. 2002. 53-62 p.

MORALES, L. et al. Dirección de flujo y clasificación del agua subterránea, en Monte Alegre, Sierra del Ajusco, México. (Mayo 2000), [Online] <http://agrociencia.com.me.htm>

ODRANOEL, QUINTERO. LEGORRETA. Análisis estructural de fallas potencialmente activas, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LV num. 1, 2002, Pág. 1-11 Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México. 2002

RAMÍREZ, ARGEMIRO. Propuesta de un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la caracterización física de la subcuenca del Río Pamplonita – Énfasis áreas de Cúcuta y Villa del Rosario – Departamento Norte de Santander, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 1999.

ROJAS PARRA, NADIA ROCÍO, ULLOA PINILLA. Alexandra. Cartografía geológica y caracterización estructural de la subcuenca de la quebrada río Sucio,

municipio de Tona, Santander, orientado a definir un modelo hidrogeológico conceptual. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2005

ROSELLO, E. Sistemas tectónicos transcurrentes: una síntesis de sus condiciones mecánicas y aplicaciones geoeconómicas. Asociación geológica Argentina, serie D. publicación especial, Buenos Aires. (5). 2 – 25 p.

ROSSELLO, E., NEVISTIC, V. La sintaxis tectónica neógena de las cordilleras oriental y Santander: aportes de modelos analógicos y controles regionales sobre los sistemas petroleros. Convención técnica de la ACGGP (3). Bogotá

SUÁREZ DÍAZ, JAIME. Accesoria geotécnica en el proyecto de pre-factibilidad de la explotación de aguas subterráneas en el Área Metropolitana de Bucaramanga, Modelo Hidrogeológico Básico de Bucaramanga, estudio realizado por Ingeniería de Suelos Ltda., Bucaramanga. 2002.

TAKASHI HIRUMA, S., RICCOMINI, C., Y MODENESI-GAULTIERI, M. (2001). Neotectónica no planalto de campos do jordão, sp. Revista Brasileira de Geociências. V 31. Sao Paulo. 376 – 386. P.

TOUSSAINT, J. Evolución geológica de Colombia. Universidad nacional de Colombia. Medellín. 1999.

TOUSSAINT, J., RESTREPO, J. Y GÓNZALEZ, H. Corte geológico cortical en Los Andes Colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Boletín Ciencias de la Tierra No. 11. Medellín, 1992. 1 – 14 p.

TOUSSAINT, J., Y RESTREPO, J. Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. V Congreso Colombiano de Geología. Memoria: Bucaramanga. 1999. 127-146 p.

TSCHANZ, CH., et al. Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, North Eastern Colombia. Bulletin Geological Society of America, Colorado, 1974. (85): 273-284 p.

VARGAS, NELSON O. Zonas Hidrogeológicas Homogéneas De Colombia, Escala 1:1.200.000. Postgrado en Recursos Hidráulicos, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogotá D.C. 2001.

VERGARA LOPEZ, OTONIEL A. Prospección geológica para aguas subterráneas en rocas cristalinas fracturadas del Macizo de Santander, sector oriental de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2003.

WARD, D. et al. Geología de los Cuadrángulos H -12 y H -13, Bucaramanga y Pamplona Vol. XXI, No. 1-3 1973.

[Online] www.guanajuato.gob.mx

[Online] www.inei.gob.pe

[Online] http://aguas.igme.es/igme/publica/sim_hidro_Murcia/tomo%20XXIII/28.pdf

[Online]

<http://verde.nau.edu/Research/Navarro/ch3.pdf#search='hydrogeological%20model>

[Online] <http://www.stormingmedia.us>