

**MODELADO GEOMECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO
EN LOS SECTORES EL GIGANTE Y LA ROSA EN
CALIFORNIA - SANTANDER**

WILFREDY MORALES RIVERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2013**

**MODELADO GEOMECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO
EN LOS SECTORES EL GIGANTE Y LA ROSA EN
CALIFORNIA - SANTANDER**

WILFREDY MORALES RIVERA

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo

Director

LUIS E. MORENO TORRES

Ingeniero Civil

Tutor

ELIANA L. MEJÍA TORO

Ingeniero Geólogo

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS**

ESCUELA DE GEOLOGIA

BUCARAMANGA

2013



AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme salud, valor, sabiduría y fuerza para realizar este trabajo y superar momentos difíciles. Gracias a la Universidad Industrial de Santander, el colegio INEM de la Ciudad de Bucaramanga y al Instituto Camacho Carreño, por haber sido mis almas mater durante dieciséis años, además de darme la oportunidad de hoy llegar a ser un profesional, me siento muy orgulloso de ser INEMITA y UIS. Agradezco a mi abuela y padres, Ana Julia Pabón, Marta Rivera Pabón y Rafael Antonio Morales Morales, por darme educación, valores y haberme acompañado y apoyado durante todo mi vida.

Gracias a mi Director Luis Moreno y Tutora Eliana Mejía, por su apoyo, colaboración, asesoría y amabilidad durante todo el tiempo de la investigación. Un agradecimiento especial a los excelentes profesores de la Escuela de Geología que durante toda mi carrera procuraron formar un geólogo de calidad y un científico, un especial agradecimiento a los profesores: Luis Eduardo Moreno Torres, Sait Khurama Velásquez, Julieta Carolina Pineda Sánchez, Jairo Clavijo Torres, Oscar Castellanos y a todos los demás profesores que me enseñaron a amar esta ciencia tan hermosa como lo es la geología. Agradezco a la empresa minera brasileña AUX Colombia SAS., por darme la oportunidad de realizar la presente investigación en su proyecto minero, un especial sentimiento hacia los siguientes miembros de la empresa por su apoyo y colaboración: Eliana Mejía, Vivianne Pinzón, Cesar Torresini, y William Pérez.

Un agradecimiento muy especial a muchos de mis compañeros estudiantes de la escuela de geología de la UIS que estuvieron conmigo durante estos cinco arduos años de estudio fuerte, como: Eliana Gutiérrez, José Luis González, Gerson Mendoza, Robinson Quevedo, Jorge Camargo Daza, Feliz Viadero, Sergio Reyes y también a todos aquellos con los compartí y aprendí.



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES.....	21
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.2. JUSTIFICACIÓN	22
1.3. OBJETIVOS	23
1.4. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	25
2. METODOLOGIA.....	28
2.1. FASE I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CRONOGRAMA	28
2.2. FASE II: RECONOCIMIENTOS PRELIMINARES	28
2.3. FASE III: CORRELACION Y DATOS DE CALIBRACION.....	29
2.4. FASE IV: MODELACIÓN, ANÁLISIS Y POSIBILIDADES DE APLICACIÓN.....	29
2.5. FASE V: ELABORACION DEL INFORME FINAL	30
3. GEOGRAFÍA FÍSICA	32
3.1. CLIMA	32
3.2. HISTORIA.....	33
3.3. ASPECTOS GEOGRÁFICOS	34
3.4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	35
3.5. HIDROGEOLOGÍA.....	44



4.	MARCO TEÓRICO	48
4.1.	DESCRIPCIÓN DE MACIZOS ROCOSOS	51
4.2.	CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO Q PARA TÚNELES, SEGÚN BARTON (1974, 2000)	69
4.3.	DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA DE TESTIGOS DE NÚCLEOS DE PERFORACIÓN ADAMANTINA O LOGGING GEOTÉCNICO.....	74
4.4.	MÉTODO DE INTERPOLACIÓN GEOMETRICA - IDW	81
5.	MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO REGIONAL.....	86
5.1.	TECTÓNICA	86
5.2.	GEOLOGÍA REGIONAL.....	90
5.3.	EVOLUCIÓN HISTÓRICA	103
5.4.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL	104
6.	RESULTADOS	110
6.1.	GEOLOGÍA LOCAL	111
6.2.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	123
6.3.	LÍNEAS GEOTÉCNICAS ES SUPERFICIE	130
6.4.	CORRELACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LAS DESCRIPCIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DE TESTIGOS	138
6.5.	LÍNEAS GEOTÉCNICAS EN GALERIAS	150
6.6.	ANÁLISIS DE DISCONTINUIDADES CON DIPS 5.103	156
6.7.	MODELADO GEOMECÁNICO DE INTERPOLACIÓN EN RECMIN 4.86 ...	163



6.8. MODELADO GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD CON UNWEDGE 3.0	181
7. ANÁLISIS RESULTADOS	190
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	196
8.1. CONCLUSIONES	196
8.2. RECOMENDACIONES.....	199
BIBLIOGRAFIA	201
ANEXOS	205



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos tomados de la norma tecnica para la realización de estudio geológicos, geotécnicos e hidrológico (CDMB, 2.005) para la elaboración del mapa de zonificación de pendientes.....	36
Tabla 2. Propiedades y ensayos de laboratorio para la caracterización de la matriz rocosa.....	50
Tabla 3. Características y propiedades a describir en campo para la caracterización de macizos rocosos.	52
Tabla 4. Escala de meteorización de rocas cuarzo-feldespáticas, según D. G. Moya.....	56
Tabla 5. Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de rocas a partir de índices de campo, según la ISRM de 1981.	57
Tabla 6. Términos y rangos para evaluar el parámetro del espaciamiento de las discontinuidades.....	60
Tabla 7. Términos y rangos para evaluar el parámetro de la continuidad o persistencia de las discontinuidades.	61
Tabla 8. Términos y rangos para evaluar el parámetro de la abertura de las discontinuidades, según la ISRM en 1981.....	66
Tabla 9. Términos para la descripción de las filtraciones en discontinuidades, según la ISRM en 1981.	67
Tabla 10. Rangos de clasificación de Barton para macizos rocosos, índice de calidad Q.....	71
Tabla 11. Estimación de los parámetros que intervienen en el índice Q.	72
Tabla 12. Valores del índice Q y su correlación con la calidad del macizo, y los recomendaciones de sostenimientos pertinentes para cada caso.....	73
Tabla 13. Valores combinados de los parámetros para las clasificaciones geomecánicas RMR, Q y R _{Mi}	78
Tabla 14. Tabla de coordenadas y valores de muestra.....	84
Tabla 15. Tabla de los pesos calculados por el método IDW.....	84
Tabla 16. Tabla del efecto del exponente del método IDW.....	84
Tabla 17. Tabla de los datos de fallas y sus cinemáticas, tomados en el trabajo de líneas geotécnicas subterráneas.	125
Tabla 18. Localización, número de estructuras medidas y valores de índice Q de Barton, para las 25 líneas geotécnicas levantadas en campo.	131
Tabla 19. Tabla de los datos de foliación, tomados en el trabajo de campo durante el levantamiento de líneas geotécnicas de superficie y subterráneas.	135
Tabla 20. Tabla de correlación entre zonas mineralizadas (HYBX y TBX) y disminuciones importantes de los parámetros y la clasificación geomecánica, para el túnel de acceso 1 (Comparar con las Gráficas del anexo D).....	142
Tabla 21. Tabla de correlación entre zonas mineralizadas (HYBX y TBX) y disminuciones importantes de los parámetros y la clasificación geomecánica, para el túnel de acceso 3 (Comparar con las Gráficas del anexo D).....	148



Tabla 22. Localización, número de estructuras medidas y valores de índice Q de Barton, para las 5 líneas geotécnicas levantadas en campo.	151
Tabla 23. Códigos de los pozos utilizados para realizar los modelos de interpolación geomecánica. Los dos pozos marcados se utilizaron en la correlación de geología y geotecnia.	166
Tabla 24. Valores orientativos de ESR en función del tipo de excavación.	180
Tabla 25. Sostenimientos definidos según el sistema de clasificación geomecánica del Q de Barton, entre los rangos de 1 y 10.	181
Tabla 26. Resumen de los datos de factor de seguridad para las 7 cuñas formadas entre los tres de discontinuidades y la sección del túnel 1, en los cuatro casos analizados.....	186
Tabla 27. Resumen de los datos de factor de seguridad para las 7 cuñas formadas entre los tres de discontinuidades y la sección del túnel 3, en los cuatro casos analizados.....	189
Tabla 28. Tabla de comparación de los valores de la clasificación Q de Barton con las metodologías nueva y antigua, en los primeros 50 m del pozo LB 525. .	191
Tabla 29. Tabla de resumen de los datos geotécnicos levantados en los frentes de avance de los primeros 148 m del túnel de acceso 1 (Geología de túnel, AUX Colombia SAS., 2012).	192



LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Panorámica del sector sur del area de cartografía, área correspondiente a la cuchilla El Violetal, donde se identifica claramente la geomorfología estructural.	39
Fotografía 2. Panorámica del sector suroeste del area de cartografía, área correspondiente a la cima y estribaciones de la cuchilla El Violetal, donde se identifica claramente los diferentes tipos de formaciones vegetativas.....	42
Fotografía 3. Testigo, Sección delgada (W32) y trabajo de laboratorio.	116
Fotografía 4. Muestra W31, vista bajo el microscopio de luz transmitida con objetivo 5x en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda). ..	117
Fotografía 5. Muestra W33, vista bajo el microscopio de luz transmitida con objetivo 5x en nicols paralelos (derecha) y nicols cruzados (izquierda). ..	118
Fotografía 6. Muestra de la Cuarzomonzonita de la cuchilla El Violetal..	119
Fotografía 7. Núcleo de perforación que muestra la unidad La Mascota. Brecha hidrotermal polimíctica con clastos subangulares cementados por una matriz de sílice gris y pirita fina en agregados (catálogo de descripción de testigos, AUX Colombia).	120
Fotografía 8. Núcleo de perforación que muestra la unidad El Gigante. Brecha tectónica matriz soportada, con foliación tectónica y estructuras cataclásticas (catalogo de descripción de testigos, AUX Colombia).	121
Fotografía 9. Panorámica donde se identifican las unidades cuaternarias en el área de confluencia de la quebrada Páez a la quebrada La Baja (sector el 20).	122
Fotografía 10. Zona de cizalla simple asociada a la cinemática de la Falla La Baja, fotografía de perfil del frente de la galería H1.....	126
Fotografía 11. Zona de cizalla simple asociada a la cinemática de la Falla La Baja, fotografía de perfil del frente de la galería H1.....	134
Fotografía 12. Afloramiento D18, donde se identifican rocas de la brecha silicificada, con matriz rocosa de resistencia R6, pero con relleno de diaclasas con limonita y hematita.	136
Fotografía 13. Afloramiento D5, donde se identifican una zona de roca muy meteorizada, un suelos residual, cuatro sets de diaclasas y valor de Q de 0.04. Base de la plataforma del emboquille del túnel de acceso 3.	137
Fotografía 14. Afloramiento D20, donde se identifican una zona de roca resistente algo meteorizada, formando bloques potenciales, tres sets de diaclasas y valor de Q de 1.90.	137
Fotografía 15. Techo del túnel H1 a 8 m del emboquille, donde se identifican una zona de roca con alteración argílica alta, generando una sobre excavación de 0.75 m de ancho por 1.20 m alto.	152
Fotografía 16. Hastial con diaclasas muy abiertas, que posee un flujo de agua subterránea continuo a 7 m desde el frente de la galería H2.	153



Fotografía 17. Entrada al túnel TG2 y techo del túnel H2 a 10 m del frente, donde se identifica el principal mecanismo de falla del macizo rocoso de buena calidad.	154
Fotografía 18. Sobre excavación antrópica realizada en la brecha hidrotermal (Mascota), en la intersección túnel H2 y túnel transversal conector de las Haches.....	155
Fotografía 19. Estalactitas, frente del túnel H1 (izquierda) y H superior (derecha).	156



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área del presente estudio, ubicado en el sector minero de El Gigante, Municipio de California.....	25
Figura 2. Mapa de las dos rutas de acceso al área de licencias de AUX Colombia en el Municipio de California identificado con el globo verde letra A, el recuadro amarillo es el área de interés.....	27
Figura 3. Esquema conceptual de la metodología utilizada en la presenta investigación.	31
Figura 4. Modelo Digital de Elevación, donde se identifican claramente los tipos de vegetación y la geomorfología morfoestructural predominante. Modelado en ArcGIS 10, partiendo de la topografía suministrada por AUX Colombia Ltda.	36
Figura 5. Mapa de zonificación generado en ArcGIS 10, utilizando los rangos de clasificación según la CDMB.	38
Figura 6. Mapa hidrológico, donde muestra la localización del macizo rocoso (MR), a demás muestra las ubicaciones y los nombres de las principales fuentes hídricas y geoformas del área a nivel regional.....	43
Figura 7. Modelo hidrogeológico conceptual para el área del cañón de la quebrada La Baja previo a la construcción de los túneles exploratorios.....	45
Figura 8. Modelo hidrogeológico conceptual para el área del cañón de la quebrada La Baja, en estadios posteriores a la construcción de los túneles exploratorios.	45
Figura 9. Formato para la toma de datos en campo según la metodología del Q de Barton, formato de la línea geotécnica D4.....	53
Figura 10. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades, según Hudson, 1989.	58
Figura 11. Representación esquemática de la medida de la orientación de planos estructurales.	59
Figura 12. Perfiles de rugosidad. La longitud de los perfiles está en el rango entre 1 y 10 metros.	63
Figura 13. Perfiles de rugosidad. La longitud de los perfiles está cada 10 centímetros con los valores del JRC	63
Figura 14. Nuevo formato para la toma de datos de logging geotécnico, diseñado para el proyecto La Mascota (AUX Colombia Ltda).....	75
Figura 15. Bloque esquemático indicativo 3D de la geometría y cinemáticas de las placas litosféricas debajo de la Cordillera Oriental y Noreste Colombiano.	86
Figura 16. Mapa del Departamento de Santander donde se muestran los tres Terrenos tectónicos que lo conforman, se identifica con el punto azul la ubicación de macizo rocoso (MR) de interés, identifica también la falla regional más importante la Falla Bucaramanga.....	87
Figura 17. Mapa geológico regional de los municipios de Suratá y California, la elipse azul es el área correspondiente al presente proyecto.	90
Figura 18. Distribución de las rocas ígneas en el Macizo de Santander, según el Inventario Minero Nacional.	94



Figura 19. Columna estratigráfica generalizada que ilustra las unidades de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, según la Agencia Nacional de hidrocarburos.....	100
Figura 20. Esquema estructural regional del Departamento de Santander.....	104
Figura 21. Imagen satelital con la ubicación del análisis estructural que afecta el área del proyecto.....	105
Figura 22. Mapa geológico en escala 1:10.000 del área de influencia del macizo rocoso de interés.....	112
Figura 23. Catálogo de variaciones litológicas de la unidad del Neis de Bucaramanga (catalogo descripción de testigos, AUX Colombia).....	116
Figura 24. Relaciones angulares en el ordenamiento de elementos estructurales asociados a cizalla simple.....	125
Figura 25. Perfil esquemático del nuevo modelo conceptual del comportamiento reológico versus estructuras mineralizadas.....	127
Figura 26. Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), para el macizo rocoso (MR) que contendrá los túneles de la empresa AUX Colombia SAS, a partir de los 2534 datos tomados en campo.....	129
Figura 27. Formato para la toma de datos en campo según la metodología del Q de Barton, formato de la línea geotécnica D11 (AUX Colombia sas., 2012).	132
Figura 28. Gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 525 (cerca a Túnel 1).....	139
Figura 29. Gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 316 (cerca a Túnel 3).....	145
Figura 30. Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), para el macizo rocoso que contiene el Túnel 1. .	159
Figura 31. Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), definidas con los datos de trabajo subterráneo. .	160
Figura 32. Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), para el macizo rocoso que contendrá el Túnel 3.	162
Figura 33. Vista 3D en el software RecMin, donde se observan los túneles de acceso y las perforaciones utilizadas en los modelos.	166
Figura 34. Leyendas de litologías y rangos utilizados en los modelos generados.	167
Figura 35. Modelos de bloques generales de la calidad del macizo rocoso, según los parámetros y la clasificación geomecánica del Q de Barton (10*10*10 m) para todo el volumen de macizo rocoso del presente estudio (MR). (a) Geología, (b) Recuperación, (c) RQD, (d) Condiciones de las discontinuidades – Ja, (f) Q de Barton.	169
Figura 36. Sección tipo de medio punto de los túneles exploratorios N° 1 y 3 de la empresa AUX Colombia, sección portal 6 x 6 m.....	171
Figura 37. Modelos de bloques generales de la calidad del macizo rocoso, según los parámetros y la clasificación geomecánica del Q de Barton (2*2*2 m) para	



el volumen de macizo rocoso que contendrá el Túnel 1 (T1). (a) Geología, (b) Recuperación, (c) RQD, (d) Condiciones de las discontinuidades – Ja, (e) Q de Barton.	173
Figura 38. Modelos de bloques generales de la calidad del macizo rocoso, según los parámetros y la clasificación geomecánica del Q de Barton (2*2*2 m) para el volumen de macizo rocoso que contendrá el Túnel 3 (T3). (a) Geología, (b) Recuperación, (c) RQD, (d) Condiciones de las discontinuidades – Ja, (e) Q de Barton.	177
Figura 39. Modelo geotécnico de formación de cunas intersectadas con la sección del Túnel de acceso 1 y diseño de sostenimiento con factores de seguridad aceptables. Pase de 3 metros. Tipo de sección punto medio.	186
Figura 40. Modelo geotécnico de formación de cunas intersectadas con la sección del Túnel de acceso 3 y diseño de sostenimiento con factores de seguridad aceptables. Pase de 3 metros. Tipo de sección punto medio.	189
Figura 41. Modelo de bloques del parámetro geomecánico del Rock Quality Designation (2*2*2 m) para el volumen de macizo rocoso que contendrá el Túnel 1.	194



LISTA DE ANEXOS

Anexo A	205
Anexo B	206
Anexo C	211
Anexo D	244
Anexo E	251



RESUMEN

MODELADO GEOMECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO EN LOS SECTORES EL GIGANTE Y LA ROSA EN CALIFORNIA – SANTANDER*

AUTOR: Wilfredy Morales Rivera

PALABRAS CLAVES: Macizo Rocoso, Clasificación Q de Barton, Túneles, Estabilidad, software de mecánica de rocas, Macizo de Santander, Neis de Bucaramanga, Vereda Angosturas, California.

La presente investigación surgió por la necesidad de construir túneles para la exploración y acceso minero, por parte de la empresa AUX Colombia SAS., y para la ejecución es necesario poseer una buena información geológica y geomecánica del macizo rocoso que contendrá los túneles en mención. Se generaron modelos geomecánicos de bloques a partir de información de descripción geotécnica de testigos, aplicando el método de interpolación geométrica de distancia inversa ponderada (IDW), utilizando tres parámetros y el sistema de clasificación geomecánica del Q de Barton. Paralelamente se realizaron observaciones de campo para determinar los controles geológicos y estructurales del macizo rocoso, en conjunto con la toma de datos geotécnicos superficiales y subterráneos para realizar la verificación de los modelos de interpolación. Los trabajos en superficie y subterráneos dieron como resultados importantes: un rango de variación de la calidad del macizo rocoso desde excepcionalmente malo a regular de acuerdo con la clasificación Q de Barton, dos familias principales de diaclasado y una foliación predominante con direcciones que generalmente se mantienen en el cuadrante NW y con buzamientos subverticales hasta moderados, pero generalmente entre 45 y 65°, dado que gran parte del macizo son rocas néisicas de composiciones variables. Mientras los resultados obtenidos modelos de interpolación definen el macizo rocoso en términos generales es de calidad media a buena (4-10 a 10-40 de Q), aunque en las zonas de fuerte alteración hidrotermal cerca al mineral, en la zona mineralizada y en zonas de cizalla la calidad disminuye hasta mala o incluso extremadamente mala (1-4 o menor que 1 de valor de Q). Finalmente se indica, que los modelos se obtuvieron con la información de los 183 pozos (LB 001 a LB 559) y no son verificables con la información actual de la descripción geotécnica de testigos, debido a cambios en la metodología.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-químicas, Escuela de Geología, Director: Luis E. Moreno Torres, Tutor: Eliana L. Mejía Toro.



ABSTRACT

MODELADO GEOMECÁNICO DEL MACIZO ROCOSO EN LOS SECTORES EL GIGANTE Y LA ROSA EN CALIFORNIA – SANTANDER*

AUTOR: Wilfredy Morales Rivera

KEYWORDS: Rock mass, clasification Q of Barton, tunnels, stability, software of rock mechanics, Macizo de Santander, Gneiss Bucaramanga, Vereda Angosturas, California.

The present study arose from the need to build tunnels for exploration and mining access, by the AUX Colombia SAS company; and for execution is necessary to have a good information geological and geomechanical of the rock mass containing the tunnels in question. Why, geomechanical models generated blocks from geotechnical logging information supplied by the company, using geometric interpolation method of inverse distance weighted (IDW), using three parameters and geomechanics classification system Q of Barton. Parallel field observations were conducted to determine the geological and structural controls of the rock mass, along with taking surface and subsurface geotechnical data for verification of model interpolation. The surface and underground worked to important results: the range of variation of rock mass quality from exceptionally bad regulate the classification according to Barton's Q, two main families of jointing and addresses predominant foliation generally kept NW quadrant twith subvertical dips to moderate, but usually between 45 and 65 °, since much of the massif are neisicas rocks of varying compositions. While the results obtained interpolation models define the rock mass quality generally moderate to good (4-10 to 10-40 Q), although in areas closet strong hydrothermal alteration mineral in the mineralized zone and in areas shear decreases to poor quality oreven extremely poor (1-4 or less than 1 Q value). Finally indicated that the models were obtained with the 183 wells information (LB 001 LB 559) and are not currently verifiable information obtained from the geotechnical logging, due to changes in methodology.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-químicas, Escuela de Geología, Director: Luis E. Moreno Torres, Tutor: Eliana L. Mejía Toro.



INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada al noreste del Departamento de Santander, comprendiendo dos sectores conocidos con los nombres de El Gigante y La Rosa, en la Vereda Angosturas del Municipio de California. El área es de aproximadamente 100 hectáreas, con centro en las coordenadas N 1'308.000 m y E 1'129.800 m.

El área de estudio está compuesta por rocas metamórficas correspondientes al Neógeno de Bucaramanga, las cuales provienen de protolitos sedimentarios y algunos ígneos y fueron metamorfizadas en facies granulita, también existen cuerpos ígneos Triásicos y Jurásicos de composición félsica, y algunos depósitos Cenozoicos Glaciales y Aluviales.

Las clasificaciones geomecánicas se han convertido en una herramienta universal para el diseño de obras subterráneas y todas aquellas que involucren macizos rocosos. Los datos necesarios para la estimación de los parámetros y propiedades del medio geológico se determinan mediante la prospección de campo tanto en rocas, como en rocas blandas e incluso en suelos. En el caso de los túneles dichas clasificaciones son también la herramienta básica de control geológico, completando y ayudando a interpretar resultados de la instrumentación de obra.

Un modelo geomecánico tiene como objetivo final estimar las variaciones espaciales de la calidad del macizo rocoso y poder considerar los sostenimientos pertinentes para la construcción de los dos túneles exploratorios.



1. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con base en una propuesta planteada para realizar una explotación minera en la zona del distrito minero de Vetas y California Santander, se piensa inicialmente en un método de explotación Open-Pit (Cielo abierto) que es el más utilizado para la explotación de metales como el oro, la plata y el cobre, ya que este tiene una mayor rentabilidad. Sin embargo debido a las limitantes ambientales, sociales y ahora legales que posee este método en Colombia, las explotaciones futuras pueden hacerse solo a nivel subterráneo, donde los túneles y galerías se convertirán en las herramientas para la explotación.

Los túneles construidos con objetivos exploratorios son utilizados como frentes de muestreo geológico-geotécnico y son una plataforma de perforación dentro de la ladera, por medio de la cual se tiene una visión más profunda y tridimensional del yacimiento a estimar. El comportamiento geomecánico del macizo rocoso que contendrá la excavación subterránea (túnel o galería) controlará su estabilidad durante y después de su construcción. Un desconocimiento del comportamiento de dicho macizo frente a la excavación, acarreará riesgos que pueden ser evitados, mayores costos en la construcción y el mantenimiento del mismo.

Basado en lo anterior, el problema radica en que existe gran cantidad de información proveniente del logueo geotécnico de los núcleos (core) de perforación, sin la generación de un modelo geomecánico del macizo en el área de los túneles 1 y 3 de AUX Colombia. Por consiguiente se procederá a caracterizar y modelar geomecánicamente el macizo rocoso.



1.2. JUSTIFICACIÓN

Todas las empresas mineras presentes en el municipio de California se encuentran actualmente en fase de exploración, entre ellas la empresa brasilera AUX Colombia Limitada. Esta enorme actividad es impulsada por el Oro (Au) principalmente, ya que según el Servicio Geológico Colombiano (2012), el Oro es uno de los minerales estratégicos más importantes para Colombia. Desde el mandato del expresidente Álvaro Uribe, el Gobierno Nacional ha adoptado medidas de alto impacto en materia minera, con la definición de los “minerales de interés estratégico” para el país, que se hizo teniendo en cuenta las tendencias del mercado internacional y las características geológicas del territorio colombiano. En la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012 se catalogaron como de interés estratégico para el país los siguientes 11 minerales: oro, platino, cobre, minerales de fosfatos, minerales de potasio, minerales de magnesio, carbón metalúrgico y térmico, uranio, hierro y coltán.

Los túneles son elaborados obedeciendo técnicas de excavación subterránea selectiva, generalmente siguiendo un rumbo donde se presumen que pueda estar una faja de mineralización y se basan en el comportamiento mineralógico del material que se va extrayendo del túnel a medida que este avanza. El objetivo de la ejecución de los cinco túneles exploratorios es mejorar el conocimiento sobre los depósitos El Gigante y La Mascota ubicados en los títulos mineros de la empresa AUX, motivo por el cual es de vital importancia tener un conocimiento previo de las condiciones de estabilidad del macizo rocoso para definir sostenimientos adecuados y garantizar la seguridad durante la fase constructiva.



1.3. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Generar un modelo geomecánico digital del macizo rocoso, a partir de los datos de descripción geológica y geotécnica de los testigos de perforación en los sectores El Gigante y La Rosa, para estimar la estabilidad de los túneles exploratorios 1 y 3 de la empresa AUX Colombia SAS.

1.1.2. Objetivos específicos

- Recopilar datos geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos existentes, con la posterior verificación y reconocimiento de campo del área que involucra las mineralizaciones de La Bodega, La Mascota y El Gigante.
- Elaborar una base de datos en la herramienta computacional con los pozos clasificados que estén dentro del área de estudio.
- Definir los posibles controles estructurales regionales y el comportamiento del agua subterránea, que afectan al macizo rocoso objeto de estudio.
- Correlacionar los datos de descripción geológica y geotécnica de testigos, para corroborar la relación existente entre el comportamiento mecánico del macizo con la geología (litología y estructura).
- Modelar a través de un software el macizo rocoso de interés y definir zonas singulares a tener en cuenta durante y después de las voladuras y construcción.



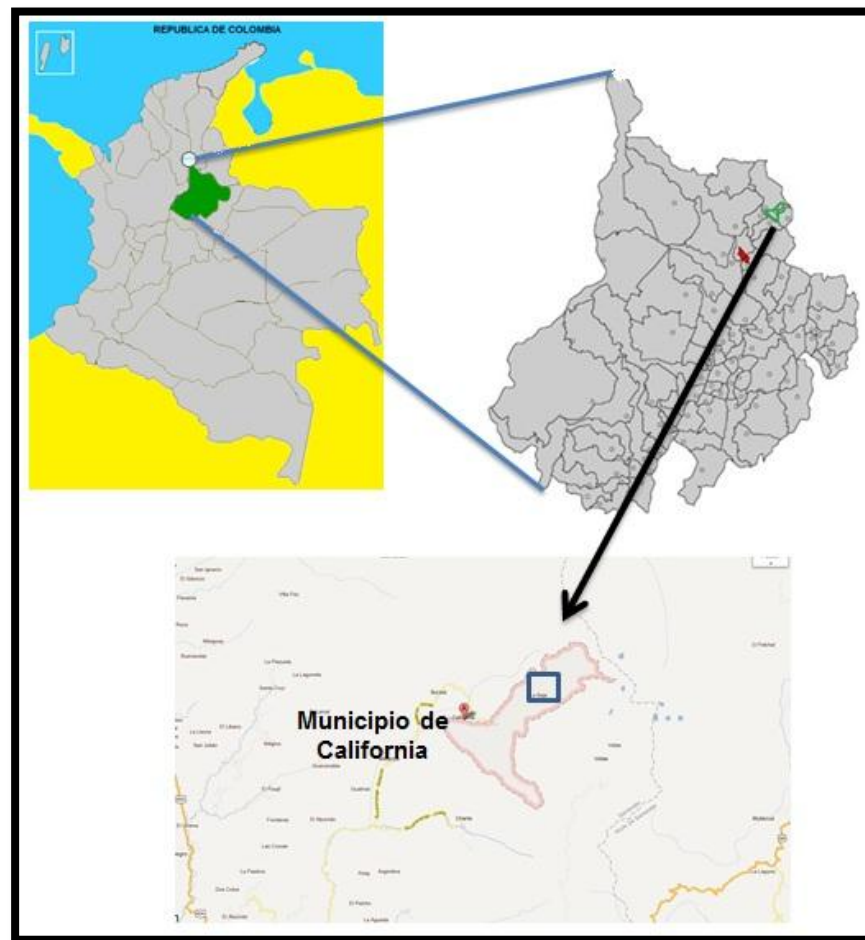
- Realizar validaciones de los modelos finales a partir de los datos del trabajo en campo y perforaciones posteriores, para determinar su coherencia con la realidad (verificación empírica).



1.4. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

La zona de estudio se localiza en los sectores de La Rosa y El Gigante, Vereda Angosturas, Municipio de California, Santander. El macizo se encuentra limitado por las quebradas: Angosturas (Este), La Baja (Sur) y San Juan (Oeste). El área superficial esta georeferenciada con las coordenadas planas 1'129.000 a 1'130.451 m.E. y 1'307.275 y 1'308.675 m.N., con un área de 110 hectáreas y un perímetro de 4300 metros aproximadamente.

Figura 1. Localización del área del presente estudio, ubicado en el sector minero de El Gigante, Municipio de California.



Fuente: Tomado de Municipios de Santander.



1.1.3. Acceso

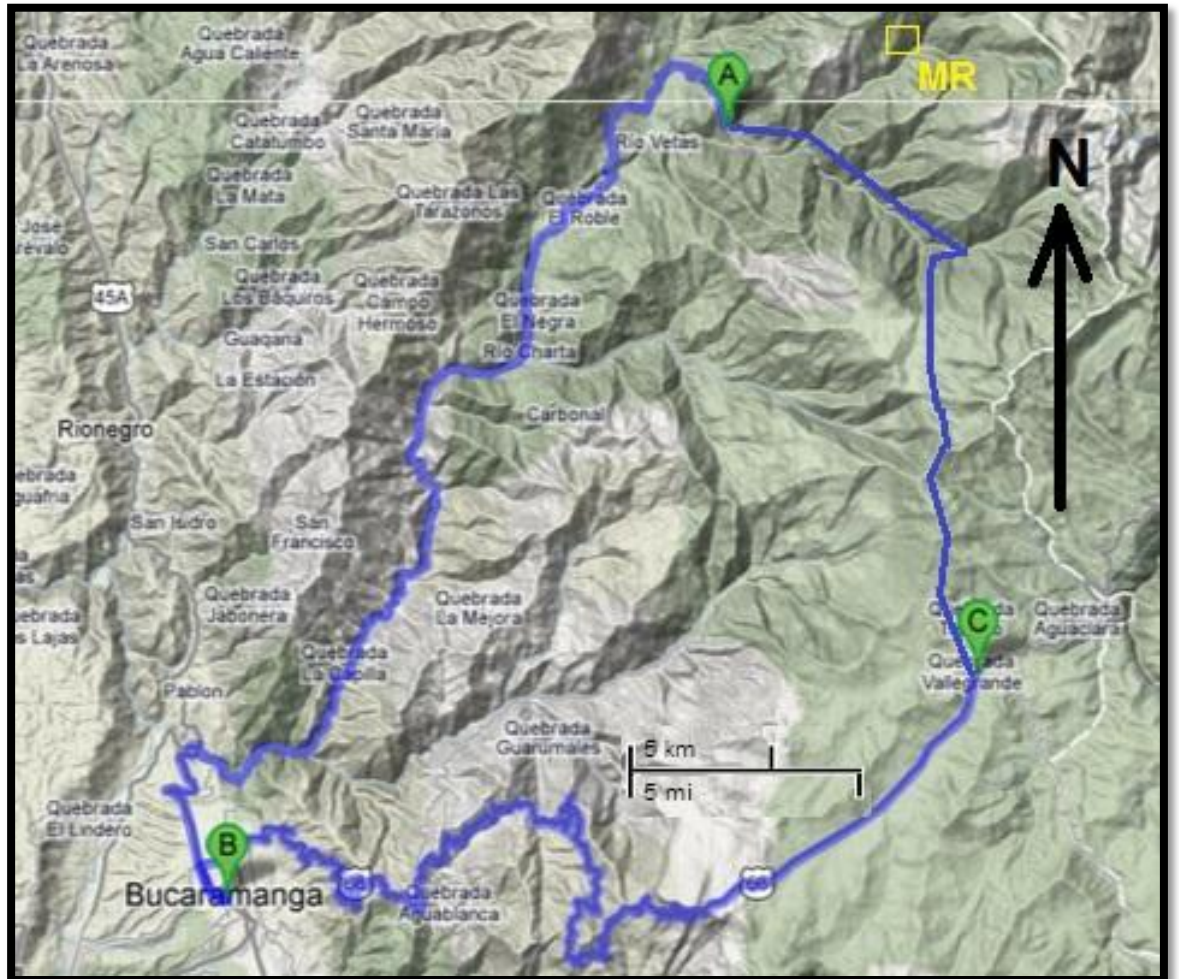
Existen diariamente varios vuelos domésticos desde Bogotá y Medellín con destino la ciudad de Bucaramanga. Adicionalmente, vuelos internacionales hacia y desde Ciudad de Panamá. El acceso vehicular al Área del Proyecto de La Mascota y La Bodega perteneciente a la empresa minera brasilera AUX Colombia Ltda., desde Bucaramanga como punto de referencia y centro urbano más cercano, corresponde a 55 kilómetros de una vía pavimentada en un 50% aproximadamente, hasta llegar al casco urbano del Municipio de California: a partir de allí son aproximadamente nueve kilómetros de camino destapado de un solo carril hasta el Proyecto mencionado. Este camino destapado desde California conecta con el centro del Proyecto La Mascota y La Bodega, y proporciona además acceso hacia las licencias de la empresa minera Ecooro (antes Greystar Resources) adyacente al Proyecto Angosturas.

Otra vía de acceso corresponde a la vía Bucaramanga – Berlín - California, donde partiendo de la ciudad de Bucaramanga utilizando la vía nacional número 66 hasta llegar al área urbana de Berlín, donde se desvía hacia el norte en dirección al Municipio de Vetas para después tomar una vía destapada hasta California. Esta ruta es más larga y con tramos largos destapados. Pero es tenida en cuenta por ser la única vía alterna, dado a los problemas habituales de estabilidad de laderas y taludes que sufre la vía principal en las temporadas de invierno (en la figura 2 se indican las dos rutas en azul).

Mientras caminos de herradura proporcionan accesos adicionales al Proyecto, principalmente a áreas lejanas del cauce de la quebrada La Baja.



Figura 2. Mapa de las dos rutas de acceso al área de licencias de AUX Colombia en el Municipio de California identificado con el globo verde letra A, el recuadro amarillo es el área de interés.



Fuente: Googlemaps.es, 2012.



2. METODOLOGIA

La modelación geomecánica involucra la recolección, comparación y análisis de una gran cantidad de información provenientes de fuentes como la perforación y las observaciones de campo.

Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados para elaborar el proyecto, se disponen las actividades que se han de llevar a cabo, mediante etapas que faciliten la realización del mismo (figura 3).

2.1. FASE I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CRONOGRAMA

Esta etapa involucra la identificación y valoración de los diversos estudios disponibles en la literatura técnica, enfocado en la caracterización geológica, mecánica de rocas, clasificaciones de macizos rocosos y lineamientos para el modelado geomecánico utilizando herramientas computacionales. Lo anterior estará acompañado con un cronograma de trabajo distribuido razonablemente para cumplir los objetivos planteados.

2.2. FASE II: RECONOCIMIENTOS PRELIMINARES

En esta etapa se realizarán las siguientes actividades:

- Recorridos de inspección donde en campo y colección de datos del macizo, útiles para la aplicación de la metodología de trabajo geotécnico implementada por los ingenieros de AUX Colombia.
- Revisión y corroboración de la geología regional y local en campo, con el objetivo de identificar las unidades litológicas, zonas de alteración hidrotermal y estructuras presentes en el macizo y sus alrededores.



- Utilización de la herramienta computacional para generar una base de datos que incluya las perforaciones que cortan el macizo de interés y verificar que los pozos contengan todos los datos pertinentes para la elaboración del modelo: valores porcentuales de recuperación de núcleos y RQD, condiciones de las discontinuidades (Ja) y valores de clasificación de Q de Barton.

2.3. FASE III: CORRELACION Y DATOS DE CALIBRACION

Con base en los datos de perforación, se realizará un análisis cualitativo de la relación existente entre la caracterización geomecánica estimada y la geología (litología y estructura) del macizo de interés.

Posteriormente, se realizará toma de datos geológicos y geotécnicos en afloramientos y galerías artesanales, con el fin de generar una base de datos adicional que ayude con la calibración y validez del modelo final a obtener (calibración empírica).

2.4. FASE IV: MODELACIÓN, ANÁLISIS Y POSIBILIDADES DE APLICACIÓN

- Modelar tridimensionalmente las posibles cuñas, partiendo de los datos estructurales tomados en los levantamientos de las líneas geotécnicas superficiales y subterráneas, utilizando los programas de la casa Rocscience (DIPS y UNWEGDE) como la herramienta de modelización.
- Modelar tridimensionalmente el macizo rocoso utilizando software minero a partir de los datos del logeo geotécnico del macizo. Lo anterior de



efectuará, con base en modelos de interpolación de datos o modelos de comportamiento geomecánico.

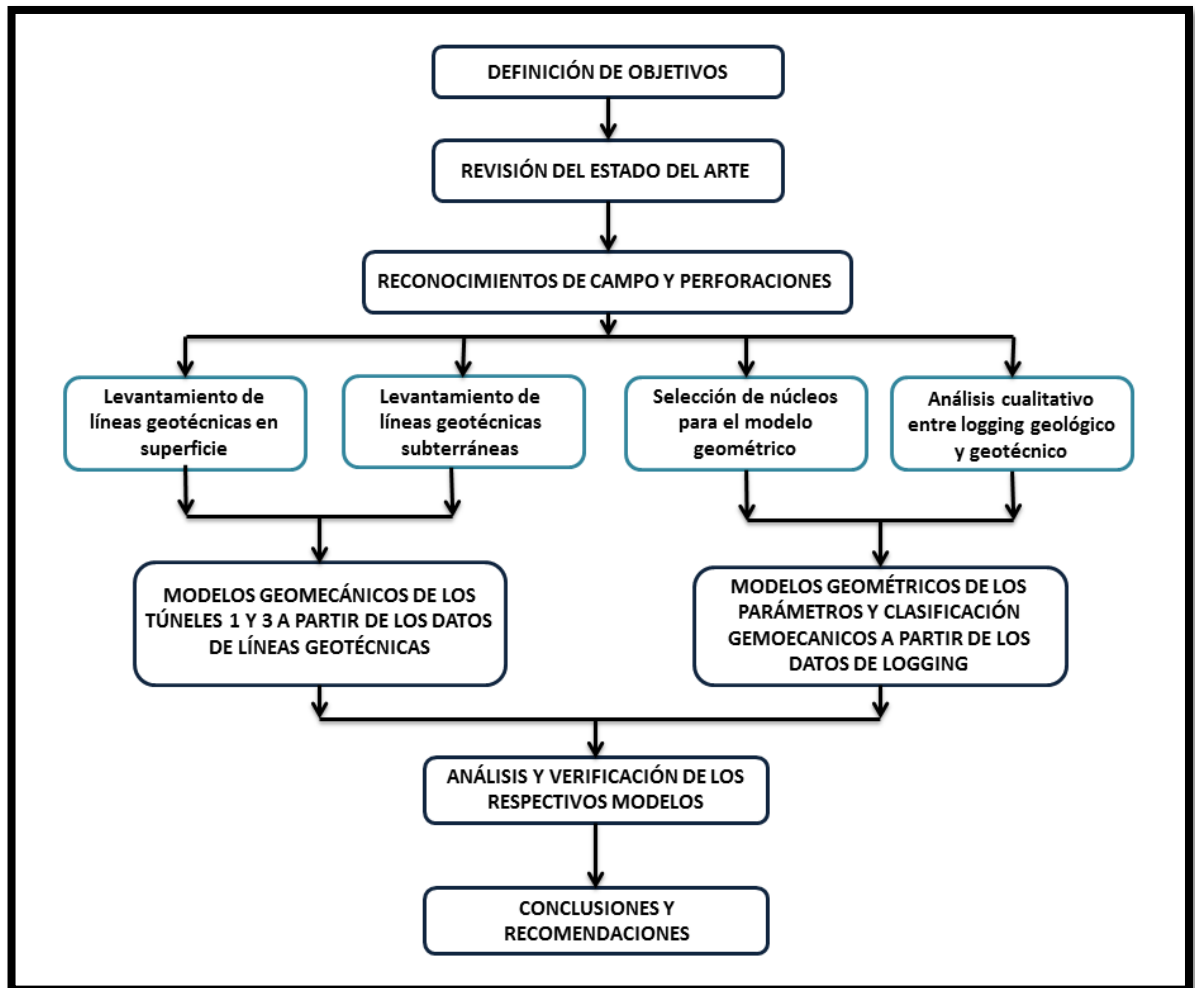
- Análisis e interpretación de los resultados obtenidos y determinación de la calidad de dicho modelo de acuerdo los datos del túnel 1 y las observaciones de campo.
- Evaluación del comportamiento del macizo frente a la futura excavación del túnel 3 (base para su diseño), de acuerdo a la coherencia del modelo obtenido en este estudio.

2.5. FASE V: ELABORACION DEL INFORME FINAL

Se platearán conclusiones generales y recomendaciones de acuerdo con la metodología utilizada, el modelo final obtenido y su posible utilización como fuente de diseño de los túneles mineros planeados.

Se elaborará y entregará un informe final.

Figura 3. Esquema conceptual de la metodología utilizada en la presenta investigación.





3. GEOGRAFÍA FÍSICA

La geografía física regional del área del presente estudio involucra una descripción somera de los principales aspectos relacionados como: el clima, la geomorfología, la hidrografía, hidrogeología y vegetación.

Para definir estos rasgos geográfico de relevancia importante se consultaron estudios preliminares del área de interés como el esquema de Ordenamiento Territorial – EOT del Municipio de California y otros estudios locales relacionados con temas geográficos, económicos y sociales de la región de Soto-norte.

3.1. CLIMA

El clima dominante en el área de la quebrada La Baja es generalmente frío y húmedo. La temperatura anual promedio es de 10° C aproximadamente, variando con la elevación sobre el nivel del mar y las condiciones climáticas. Generalmente posee dos estaciones lluviosa durante el año, una desde Octubre hasta Noviembre y la otra desde Abril hasta Mayo. El promedio anual de precipitaciones es cerca de 1.500 a 2.000 milímetros.

Con la información anterior se definió que la zona de vida según L.R. Holdridge, es: Bosque muy húmedo.



3.2. HISTORIA

El Distrito Minero de Vetas y California (DMVC) se descubrió presuntamente en 1549 durante una acción militar española a pesar de que ya había sido el sitio de minería por los indígenas Sura en tiempos Pre-Colombinos. Las colonias españolas ocuparon en dos operaciones open-pit el distrito de San Antonio en la vereda La Baja y La Perezosa, inmediatamente al noreste del Proyecto La Bodega. La producción continuada en una pequeña escala a través de los siguientes dos siglos y medio.

Aproximadamente 1.500 metros acumulados de túneles. Ninguna perforación fue sistemática, hasta la llegada de la exploración moderna conducida por Ventana Gold Corp.'s (Reeves, 2006). No existen estimaciones del recurso mineral disponibles de la propiedad.

Ventana inicia sus actividades exploratorias en La Bodega en Marzo del año 2006 incluyen mapeo geológico, trabajos de muestreo de canal y subterráneo, y superficiales de suelos y geofísico en toda la propiedad. La perforación de diamante comenzó en Agosto de 2006 y han continuado desde entonces.

En Marzo de 2011, Eike Batista, el hombre más rico de Brasil y el séptimo más rico del mundo, adquirió por \$ 59 Millones de Dólares (USD) la minera Ventana Gold Corporation, con licencias para la exploración de oro sobre 200 hectáreas en el Distrito Minero de California, Santander.



3.3. ASPECTOS GEOGRÁFICOS

La Subregión a la cual pertenece el Municipio de California, está además integrada por los Municipios de Bucaramanga, Matanza, Suratá, Vetas, Charta y Tona. La Subregión determinada forma parte de la Provincia de Soto Norte, en el sector Nororiental del Departamento de Santander, conocida también como Región Oriental o Macizo de Santander. Geológicamente se localiza en la zona de influencia de las Fallas de Bucaramanga- Santa Marta y de Suratá. Hidrológicamente, pertenece a la gran cuenca del Río Magdalena, Cuenca Superior del Río Lebrija, Subcuenca del Río Suratá y Micro cuencas de los ríos Tona, Vetas y Charta. La Subregión cuenta con una extensión territorial de 1248 Km² y una población aproximada de 540.350 habitantes, incluida Bucaramanga (Censo General DANE, 2.005). Todos los municipios que la conforman por pertenecer a la Provincia de Soto, se encuentran bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

El Municipio de California se encuentra en territorios montañosos, dentro de los cuales están comprendidos páramos que sirven de límites naturales con el Departamento de Norte de Santander, en los que por su topografía se contemplan los pisos térmicos frío y páramo y están regados por las aguas del río Vetas, la Quebrada La Baja afluentes del río Suratá y algunos afluentes menores. A 51 Km aproximadamente al NE de Bucaramanga, se ubica el municipio de California. La principal riqueza del municipio la constituye la explotación de las minas auroargentíferas ubicadas en los sitios La Baja, Angosturas y La Alta. Últimamente, con la llegada de las compañías Greystar Resources Ltda, Galway Resource, Calvista y AUX Colombia, la minería ha cobrado vital importancia, y se visualiza un futuro promisorio para este municipio, considerado hoy por hoy como el de mayor proyección e importancia económica del Departamento de Santander.



3.4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

La geomorfología del área presenta un control estructural conformado por rocas cristalinas en su totalidad: por un lado rocas metamórficas de alto grado de metamorfismo de edad proterozoica (Neis Bucaramanga) y por el otro lado rocas ígneas intrusivas félsicas de edades Triásico – Jurásico (Batolito de Santa Barbará y Plutón de Páramo Rico). A demás de la presencia de lineamientos estructurales bien marcados en direcciones paralelas a los cauces de aguas superficiales, dado que la estructuras geológicas controlan los patrones de drenaje regional.

Debido a los controles geológicos anteriormente mencionados, la morfometría (pendientes) es muy inclinada o abrupta con una red de drenaje local subparalela y valles estrechos y profundos (cañones) en forma de V, una geomorfogénesis estructural predominantemente y una vegetación abundante principalmente arbórea (figura 4).

3.4.1. Morfometría

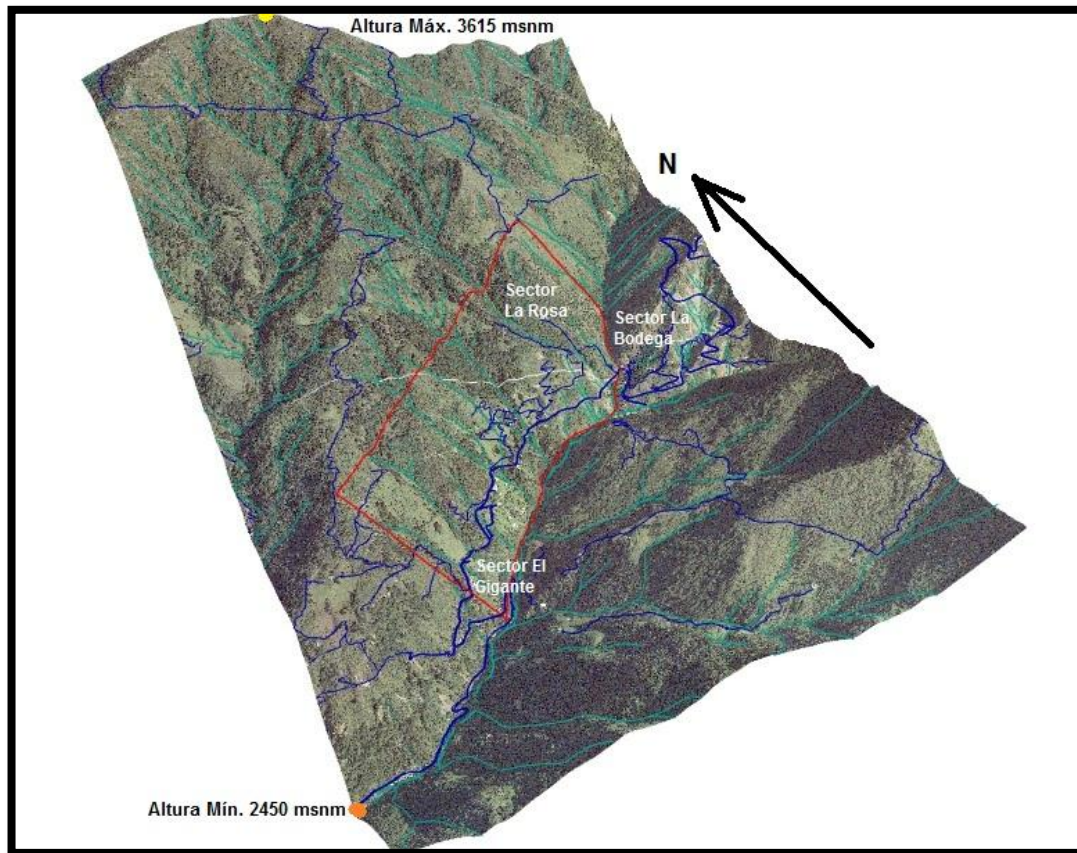
Es la parte de la geomorfología que presenta la descripción cuantitativa de características del terreno como la inclinación (slope o pendiente). Se utilizaron los rangos de clasificación de pendientes de la CDMB de 2005 (tabla 1). En la figura 4 se registraron las cotas de máxima altura (3.615 msnm) y de mínima altura (2.450 msnm), con lo cual la diferencia de nivel del área de estudio es de 1.165 metros. De acuerdo con el mapa de zonificación de pendientes de la figura 5 (ver anexo 3), se puede dar a conocer aspectos generales sobre la morfometría del área de interés.



Tabla 1. Rangos tomados de la norma tecnica para la realización de estudio geológicos, geotécnicos e hidrológicos (CDMB, 2.005) para la elaboración del mapa de zonificación de pendientes.

INTERVALO	PENDIENTE %	DESCRIPCIÓN	% DE INFLUENCIA
1	< 10	Plano a Ligeramente Inclinado	0,7
2	10 a 57	Inclinado	29,64
3	57 a 100	Muy Inclinado	61,47
4	> 100	Escarpado	8,19

Figura 4. Modelo Digital de Elevación, donde se identifican claramente los tipos de vegetación y la geomorfología morfoestructural predominante. Modelado en ArcGIS 10, partiendo de la topografía suministrada por AUX Colombia Ltda.





En el área del presente estudio según el mapa de pendientes generado en el software ArcGIS 10 (figura 4), el terreno es generalmente Muy Inclinado a Inclinado (aproximadamente el 91%) es decir con pendientes entre el 10 y 100%, donde dominan las pendientes entre el 57 y 100%.

Las pendientes escarpadas (> 100%) se concentran en las laderas terminales cerca a los flujos de agua y también están muy dispersas de manera puntual por toda la zona.

Las pendientes muy inclinadas (57-100%) son las más importantes y abundantes en toda el área cartografiada, localizadas principalmente en las laderas medias y altas que conforman los profundos valles (cañones) formados por la incisión de las principales quebradas.

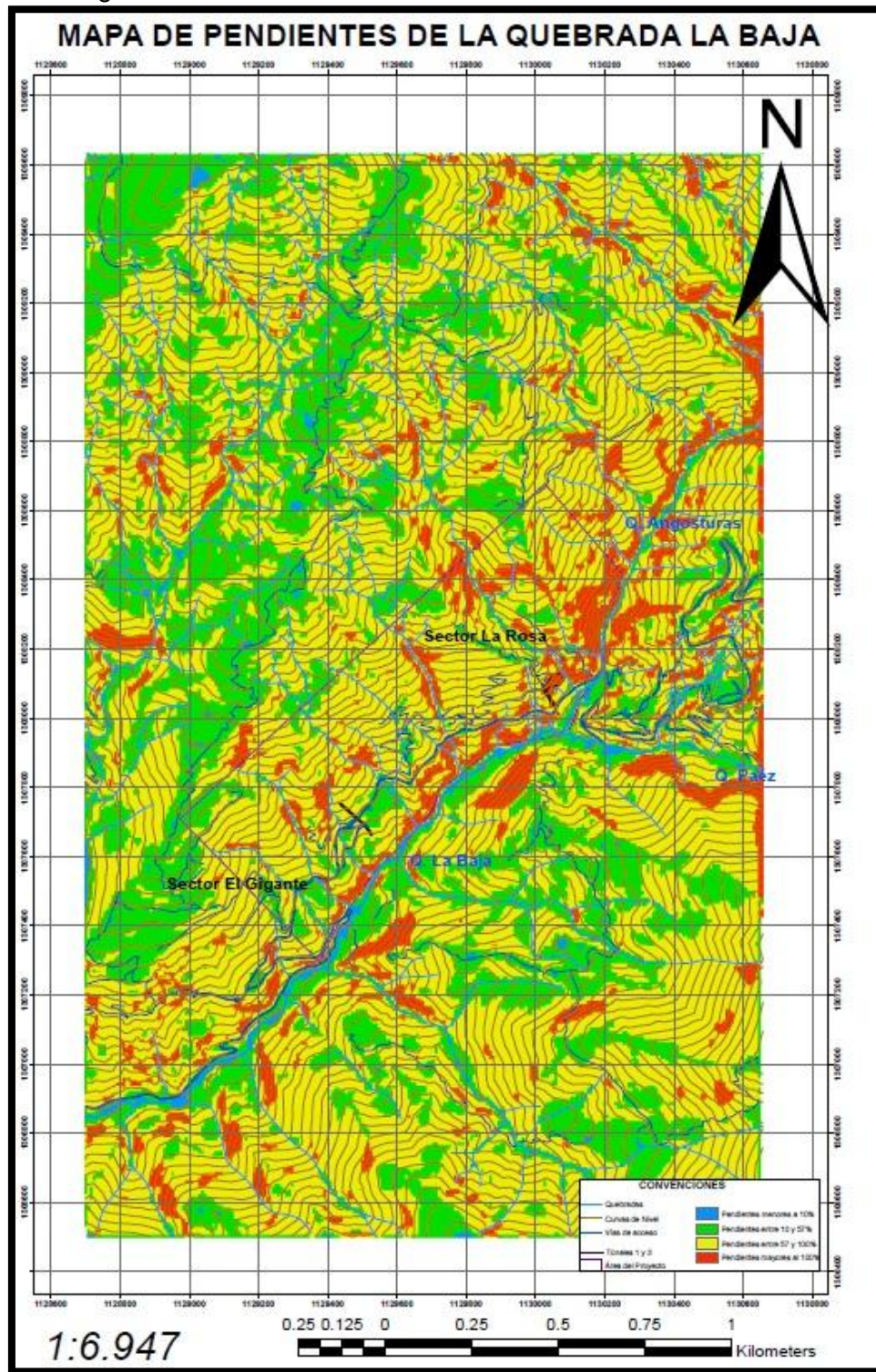
Las pendientes Inclinadas (10 – 57%) son las segundas más relevantes según el análisis morfométrico de la zona, localizadas principalmente en los lomos estructurales (divisorios de aguas o salientes) de mayor longitud, como por ejemplo la divisoria Este paralelo a la quebrada San Juan (gran zona de color verde).

Las pendientes Planas y Ligeramente inclinadas (< 10) se limitan casi exclusivamente a las áreas de sedimentación aluvial (terrazas de los cauces mayores) y las zonas intervenidas antrópicamente (terraceó antrópico).

En la figura 5, se identifica el mapa de pendientes antes descrito.



Figura 5. Mapa de zonificación generado en ArcGIS 10, utilizando los rangos de clasificación según la CDMB.





3.4.2. Morfogénesis

La dinámica externa o morfogénesis estudia y explica la génesis y evolución del modelado de la superficie de la corteza terrestre (morfo: forma, y genes: origen). Los mapas de procesos morfogénéticos se elaboran a escalas muy variadas e involucran las relaciones generales y detalladas entre factores ambientales y el conjunto de las características del comportamiento y evolución de los sustratos rocosos y de las formaciones superficiales (suelos).

Según la clasificación geomorfológica presentada en la “Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica”, la geomorfogénesis (geomorfología dinámica) del área del presente estudio casi en su totalidad se puede definir como “Morfoestructural”, mientras una pequeña fracción presenta geomorfologías aluviales y glaciales, y otra aún más pequeña denudacional (deslizamientos en suelos residuales muy desarrollados).

Fotografía 1. Panorámica del sector sur del área de cartografía, área correspondiente a la cuchilla El Violetal, donde se identifica claramente la geomorfología estructural.





- **Morfogénesis Estructural**

Según Marta *et al.* 2007, son aquellas geoformas generadas a partir de la combinación de procesos endógenos (internos) y exógenos (externos), los cuales crean cambios significativos sobre la superficie. Sin las fuerzas internas la Tierra tendría una superficie uniforme sin relieve, pero es el tectonismo el encargado de desarrollar las formas más relevantes, las cuales se pueden clasificar de acuerdo con la escala en la cual se consideren sus características. Los aspectos que se relacionan con estas geoformas son la estratificación, las fallas, los pliegues, los lineamientos, la foliación metamórfica, entre otras.

Pero en este tipo de morfología se presenta una meteorización muy fuerte debida al intemperismo, generando una producción de suelos residuales bastante importante, con mayor potencia en la ladera norte, lo cual es un inconveniente porque allí se ubicaran los emboquilles de los tres túneles exploratorios de la empresa.

Dentro de estas geoformas estructurales puntuales se identificaron: lomos estructurales, cimas estructurales, lomos de obturación y laderas estructurales principalmente. Esto según la clasificación utilizada por Marta *et al.*, para definir las geoformas estructurales al oriente de la ciudad de Bucaramanga, donde afloran también las unidades cristalinas del Macizo de Santander.

Las anteriores geoformas son identificables en la fotografía 1.



- **Morfogénesis Aluvial y Coluvial**

Estas dos tipos de geoformas son poco relevantes en extensión debido a que limitan a zonas muy puntuales. Se encuentran definidas por zonas de depositación antiguas o actuales, es decir, donde se encuentran los depósitos de los cauces como terrazas aluviales, llanuras de inundación y depósitos coluviales por deslizamientos principalmente.

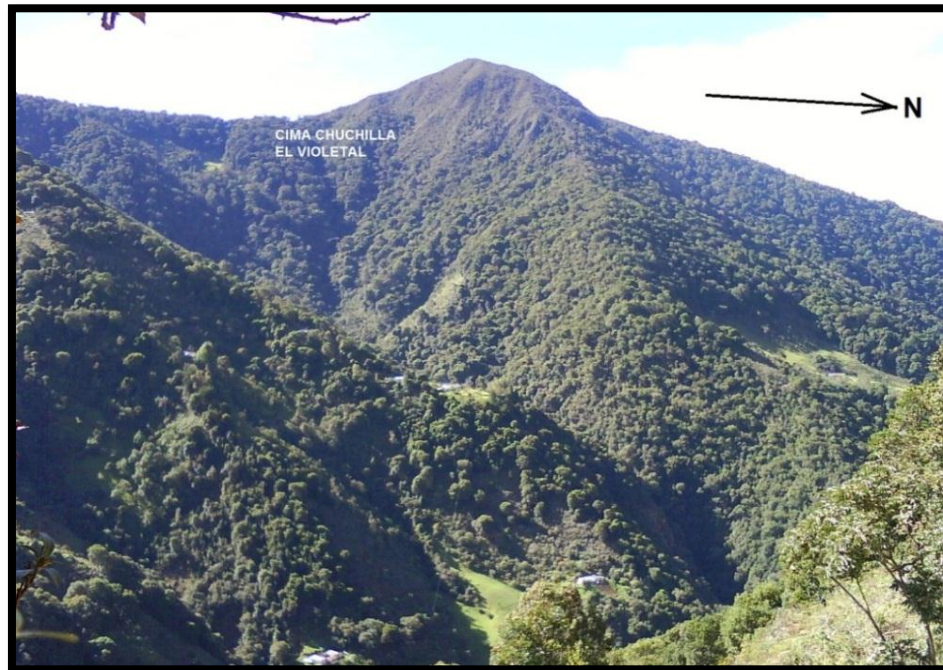
En algunos estudios anteriores en el área, se cartografiaron cuerpos pequeños y aislados de antiguos depósitos sedimentarios de origen glacial (Mendoza & Jaramillo, 1975).

3.4.3. Vegetación

Como se muestra en la figura 2, de manera generalizada la vegetación se puede clasificar de acuerdo a los siguientes parámetros: densidad, altura y tipo de vegetación predominante en una determinada zona. Esos parámetros definen cinco tipos de formaciones vegetales: páramo, bosque o selva, matorral o rastrojo, pastizal y cultivos o suelo antrópico. Todas las formaciones vegetales se encontraron en el área del presente estudio, con un dominio claro de los bosques y rastrojos.



Fotografía 2. Panorámica del sector suroeste del área de cartografía, área correspondiente a la cima y estribaciones de la cuchilla El Violetal, donde se identifica claramente los diferentes tipos de formaciones vegetativas.

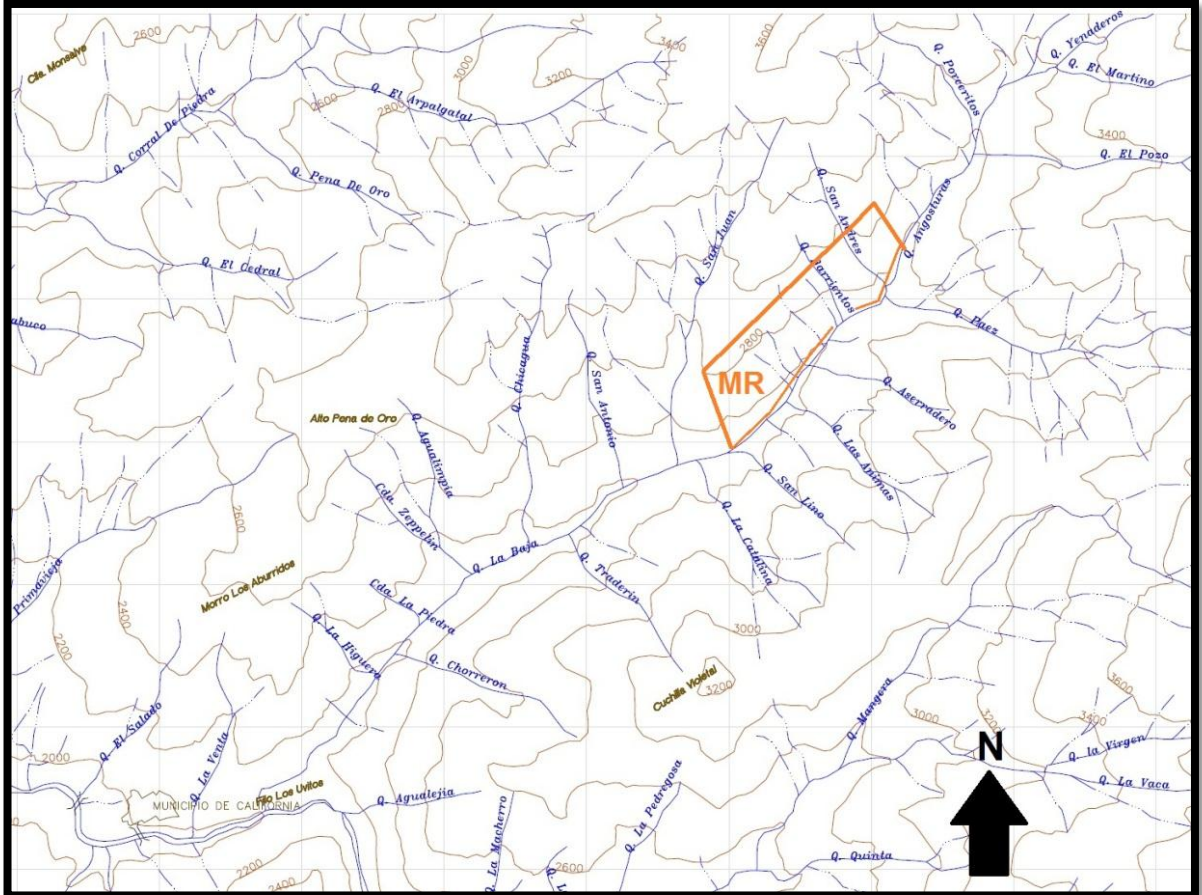


3.4.4. Red de drenaje

El área donde se localiza el macizo rocoso a modelar (MR) se encuentra en la ladera noroeste que conforman los valles de las quebradas Angosturas y La Baja como muestra la figura 6 (ver anexo A, planchas topográfica 110-I-C en escala 1:25.000, 1963). En el mapa se identifican los nombres de quebradas y rasgos geográficos importantes de la región.



Figura 6. Mapa hidrológico, donde muestra la localización del macizo rocoso (MR), a demás muestra las ubicaciones y los nombres de las principales fuentes hídricas y geoformas del área a nivel regional.



Fuente: IGAC, 1963.

El valle en V se encuentre disectado por drenajes o cauces menores, que muestran un patrón de red de drenaje subparalelo: este patrón de drenaje se presenta principalmente cuando el conjunto de tributarios corre siguiendo un subparalelismo entre sí, dirigiéndose a una corriente mayor, como se ve claramente en la figura 6. Este tipo de red se genera en las siguientes condiciones naturales: pendientes altas, control topográfico o estructural, rocas con baja permeabilidad, pendientes moderadas a altas (para este caso), cobertura vegetal media a baja, cauces cortos y de poco caudal.



3.5. HIDROGEOLOGÍA

Para la elaboración del plan de trabajos y obras (PTO) por parte de AUX, la empresa contratista AUSENCO presento un modelo hidrogeológico para las laderas que conforman el cañón de la quebrada La Baja, denominado “La Bodega: Análisis Hidrológico e Hidrogeológico para la construcción y Operación del Túnel de Exploración La Mascota”, un trabajo recopilado y corroborado con las observaciones de campo, dado a que los túneles exploratorios 1, 2 y 3 se ubicaran en estas áreas.

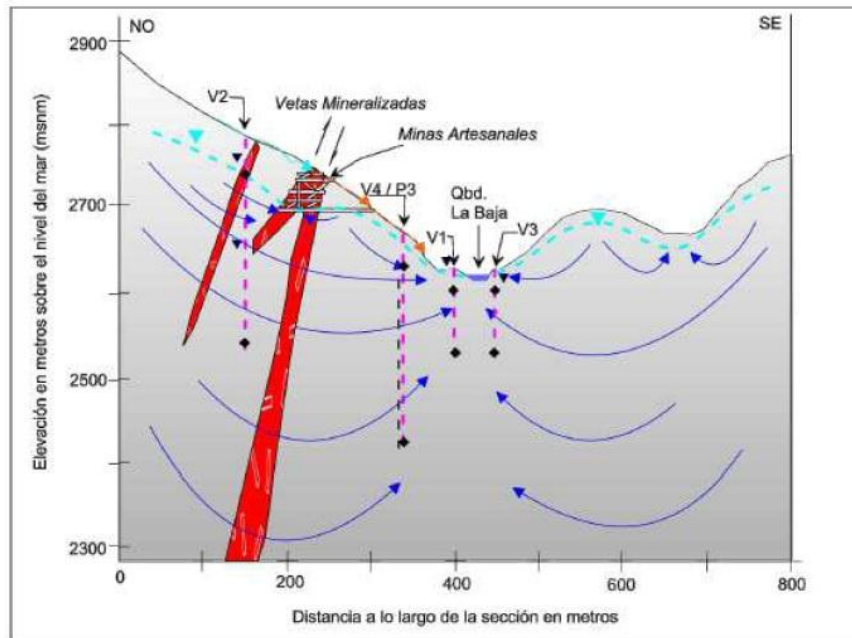
El modelo hidrogeológico que a continuación se presenta, tiene como base el Estudio hidrológico e hidrogeológico adelantado en 2010 por la empresa contratista AUSENCO en esa época para la empresa Ventana Gold Corporation. En ese estudio se detalló el medio físico, los resultados de las investigaciones de campo, los estudios climatológicos y de aguas superficiales, y los estudios de aguas subterráneas.

3.5.1. Modelo conceptual

Las figuras 7 y 8, ilustran los modelos hidrogeológicos conceptuales para las condiciones actuales y las potenciales condiciones futuras debido a la construcción de un túnel exploratorio. La figura 6 es consecuente con las observaciones realizadas en campo durante la ejecución de esta investigación, porque las galerías artesanales visitadas se comportan como drenes de gran sección que poseen flujos de aguas subterráneas de poco caudal, resultado de la sumatoria de todos los goteos por las discontinuidades en las paredes y techos de dichas galerías, estos flujos son generalmente continuos para la mayoría de los casos, aunque en las galerías a mayor altitud el caudal va decreciendo.

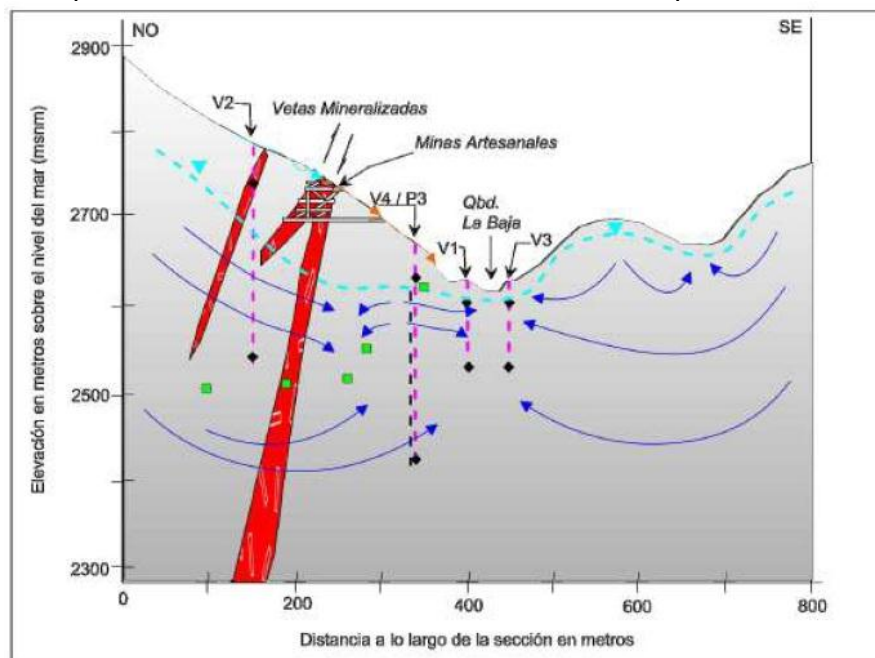


Figura 7. Modelo hidrogeológico conceptual para el área del cañón de la quebrada La Baja previo a la construcción de los túneles exploratorios.



Fuente: AUSENCO, 2010.

Figura 8. Modelo hidrogeológico conceptual para el área del cañón de la quebrada La Baja, en estadios posteriores a la construcción de los túneles exploratorios.





De las anteriores figuras del estudio realizado por Ausenco (2010) concluye lo siguiente:

- Basados en el análisis de los datos del nivel de agua, el nivel freático sigue la superficie topográfica del área y la descarga del agua subterránea hacia la quebrada La Baja proviene del área circundante. El área, aguas arriba de la quebrada La Baja, se afora en mayo de 2010, durante la llegada de la época de lluvias en alrededor de 170 litros por segundo; las mediciones de aportes o perdidas a través del cauce no pudieron ser obtenidas debido a las características del lecho y del caudal. Basado en el modelo hidrogeológico conceptual de la quebrada La Baja y modelos numéricos preliminares, el caudal base promedio para el año de precipitación normal es estimado en aproximadamente 50 a 170 l/s. Sin embargo, se requieren de investigaciones de campo adicionales que confirmen esta estimación.
- El informe utiliza el método de balance hídrico y un área aguas arriba del área del proyecto de 21.4 Km², la tasa de recarga de agua subterránea a la escala de la cuenca se estima entre 7% y 24% de la precipitación promedio anual (1.025 mm/año) o 74 mm/año a 250mm/año. No obstante, se estima que la recarga es significativamente variable en el espacio dependiendo de la geología, pendientes, variaciones en evapotranspiración y permeabilidad del lecho rocoso.
- Las pequeñas minas artesanales existentes en el área planeada para el desarrollo de los túneles exploratorios, han desarrollado conos de depresión locales en el nivel freático y han generado flujos hacia las antiguas labores mineras (figura 6). Esto causa potenciales descargas desde las antiguas labores mineras hacia las corrientes adyacentes. Es probable que en las futuras operaciones mineras se tenga que decidir entre



reducir la descarga de estos trabajos más antiguos (usando tapones) o permitir la descarga natural y considerar un tratamiento del agua a largo plazo. Se proyecta que los túneles de exploración actúen como un drenaje hidráulico en el área local de El Gigante y La Rosa, respectivamente. Esta condición, así como los esfuerzos potenciales para desaguar el acuífero y reducir el caudal afluente a las labores mineras, reducirá el nivel freático local en el área (figura 7). Esta condición puede tener una afectación medible en las fuentes de agua locales y en el caudal de aguas superficiales en las proximidades de los Túneles exploratorios.

3.5.1. Modelo conceptual

Un modelo numérico de flujo de agua subterránea (modelo de flujo) fue previamente construido para complementar el modelo hidrogeológico conceptual del año 2010 y proveer estimaciones de caudales de ingreso a los túneles 1, 2 y 3. La extensión lateral del modelo de flujo es igual al modelo original y abarca la cuenca de la quebrada La Baja (figura 5), desde los nacimientos en el páramo de las quebradas Angosturas y Páez hasta la desembocadura de la quebrada La Baja en el río Vetas cerca de la cabecera municipal de California. La extensión vertical se incrementó a una profundidad base de aproximadamente 1.470 msnm para permitir que un régimen de flujo más profundo sea simulado en el modelo. Ellos seleccionaron el valor geométrico medio (50º percentil) de permeabilidad de 3.1×10^{-2} m/día para el caso base del modelo de flujo. La conductividad hidráulica de campo para el caso base del modelo es isotrópica y homogénea, por falta de ensayos de bombeo a largo plazo, las estimaciones confiables de parámetros de almacenamiento se basan en la experiencia profesional y son consistentes con los esfuerzos de modelados previos. El rendimiento específico y el almacenamiento específico los estimaron en 0.01 y 2×10^{-4} m/m.



4. MARCO TEÓRICO

Según el Comité Nacional sobre Mecánica de Rocas de los Estados Unidos, la Geomecánica es la rama de la mecánica referente a la respuesta de la roca o de los macizos rocosos a los campos de fuerzas (esfuerzos) de su ambiente físico.

González de Vallejo *et al.* (2002), define a la Matriz Rocosa como el material exento de discontinuidades o los bloques de “roca intacta” que quedan entre ellas, tienden a tener un comportamiento heterogéneo y anisótropo relacionado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente se caracteriza con base a su peso específico, resistencia a la compresión y deformabilidad.

La superficie de discontinuidad corresponde a cualquier plano de origen mecánico o genético que separa bloques de matriz rocosa en un macizo. Mecánicamente queda caracterizada por su resistencia al corte o por la del material de relleno. Generalmente la resistencia a la tracción de esta superficie tiende a ser muy baja o nula. Los macizos rocosos son el conjunto integrado que se encuentra constituido por la “roca intacta” o bloques de matriz rocosa separados por discontinuidades o superficies de debilidad. Además de ser medios anisótropos, discontinuos y heterogéneos, mecánicamente hablando. Se puede considerar que estos presentan una resistencia a la tracción nula.

Abril *et al.* (2010), menciona que el estudio de los macizos rocosos fue muy importante durante la época de ejecución de los importantes túneles construidos en Europa y en los Estados Unidos. Dieron origen a los métodos de clasificación de macizos rocosos que se emplean ahora para cualquier tipo de intervención ingenieril.

Los túneles inician su historia debido a la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo montañoso. El primer túnel del Renacimiento es



la Mina de Daroca en la provincia de Teruel que cuenta con 600 m de longitud, 6 m de ancho y una altura variable entre los 7 y 8 m. (NAVARRO et al., 2011).

Por lo que a la Geotecnia aplicada se refiere, deben mencionarse los importantes avances en el campo de la Mecánica de rocas y de suelos, referentes a las obras subterráneas. Podemos decir que esta disciplina que, a finales de los años 50, hizo su entrada en el, hasta entonces mundo crítico de las obras subterráneas, ha dado a su construcción un creciente soporte científico y técnico que ha encontrado su máxima expresión en las últimas dos décadas, hasta el punto de que hoy en día, los túneles se hacen bajo la supervisión de un experto en Geotecnia (LOPEZ, 1998). Las clasificaciones geomecánicas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, y de aquí estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento en un túnel dado. La Geotecnia proporciona criterios y datos básicos para el desarrollo de un proyecto minero tanto en su fase de diseño como durante el desarrollo de las excavaciones. En la tabla 2, se indican las propiedades y ensayos de laboratorio requeridos para caracterizar la matriz rocosa.

Según Chacón & Guevara, las propiedades índices de mayor interés y relevancia al momento de identificar y caracterizar cuantitativamente la matriz rocosa son:

- Estudio Petrográfico: realizado a través de las descripciones macroscópicas de las muestras de mano y afloramientos, y el análisis microscópico de secciones delgadas, con el objeto de determinar la composición mineralógica, textura, porosidad, grado de alteración (dado por alteración hidrotermal o meteorización), microfracturación y fábrica.



- Peso Específico (γ): definido como el peso por unidad de volumen y depende de composición de las diferentes unidades litológicas, este parámetro es adimensional a diferencia de la densidad.
- Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa (σ_c): corresponde al máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, se determina en una muestra de roca cilíndrica (probeta, núcleo o core) sin confinar en el laboratorio. Este parámetro puede ser calculado directamente desde ensayos de compresión simple o ensayos de carga puntual (PLT), este último es el más empleado por la empresa AUX Colombia, para estimar la resistencia de la “roca intacta”.

Tabla 2. Propiedades y ensayos de laboratorio para la caracterización de la matriz rocosa.

	PROPIEDADES	METODOS DE DETERMINACION
Propiedades de identificación y clasificación	Composición mineralógica Fábrica y textura Tamaño de grano Color	Descripción visual Microscopía óptica y electrónica Difracción de rayos X
	Porosidad (n)	Técnicas de Laboratorio
	Peso específico o unitario (γ)	
	Contenido de humedad	
	Permabilidad o Conductividad hidráulica (k)	Ensayo de permeabilidad
	Dubilidad. Índice de alterabilidad	Ensayos de alterabilidad
Propiedades mecánicas	Resistencia a la compresión simple (σ_c)	Ensayo de compresión Ensayo de carga puntual Martillo Schmidt
	resistencia a la tracción (σ_t)	Ensayo de tracción directa Ensayo Brasileño
	Velocidad de ondas sísmicas (V_p, V_s)	Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio
	Resistencia (parámetros c y ϕ)	Ensayo de compresión triaxial
	Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos: ϵ , o dinámicos: ν)	Ensayo de compresión uniaxial Ensayo de velocidad sísmica

Fuente: González de Vallejo *et al.*, 2002.



4.1. DESCRIPCIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

Según González de Vallejo et al. (2002), la descripción y caracterización de los macizos rocosos en afloramientos es un labor necesaria en todos los estudios de ingeniería geológica cuyo objetivo sea el conocimiento de las propiedades y características geotécnicas de los materiales rocosos. Estos trabajos se realizan durante las primeras etapas de las investigaciones *in situ*.

La metodología para la descripción de los afloramientos de macizos rocosos se puede resumir de la siguiente manera:

- Litología y grado de meteorización
- Estructura del Macizo Rocosos
- Características de las discontinuidades
- Flujo de agua en el macizo rocoso

Las descripciones de los macizos rocosos precisan de observaciones y medidas adicionales a las geológicas; de ahí la necesidad de establecer una sistemática que homogenice criterios y facilite la comunicación entre todos los profesionales que tengan que realizar trabajos de descripción de macizos rocosos. Estas descripciones pueden implicar un cierto grado de subjetividad que debe evitarse, en la medida de lo posible, realizando observaciones sistemáticas y utilizando terminologías estandarizadas, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Todos los factores deben examinarse sistemáticamente y en secuencia lógica.
- No debe omitirse información básica sobre el afloramiento.
- Las descripciones deben comunicar una imagen mental precisa y permitir deducir la información más relevante.



Consecuente con lo mencionado en los párrafos anteriores, se utilizó la metodología (parámetros) de la clasificación geomecánica del índice Q de Barton, consignados en los formatos de campo, basados en dicha clasificación y modificados por Geología de Túnel de AUX para una mayor facilidad de la toma de datos de campo (figura 9). La tabla 3 muestra las características y propiedades a describir en campo los macizos rocoso y cual método se utiliza para su descripción.

Tabla 3. Características y propiedades a describir en campo para la caracterización de macizos rocosos.

Ámbito de Estudio	Característica o propiedad	Método	Clasificación
Matriz Rocosa	Identificación	Observaciones visuales y con lupa	Clasificación geológica y Geotécnica
	Meteorización	Observaciones visuales	Índices estándar
	Resistencia	Índices y ensayos de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
Discontinuidades	Orientación	Medida directa con brújula geológica	
	Espaciado	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Continuidad		
	Rugosidad	Observaciones y medidas de campo	Camparación por perfiles estándar
	Resistencia de las paredes	Martillo Schdmit Índices de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
	Abertura	Observaciones y medidas de campo	Índices estándar
	Relleno		
Filtraciones			
Macizo Rocoso	Número de sets de discontinuidades	Medidas de campo	Índices y clasificaciones
	Tamaño del bloque		
	Intensidad de fracturación		
	Grado de Meteorización	Observaciones de campo	Clasificaciones estándar

Fuente: González de Vallejo *et al.*, 2002.



Figura 9. Formato para la toma de datos en campo según la metodología del Q de Barton, formato de la línea geotécnica D4.

REGISTRO GEOTÉCNICO MODELACIÓN TÚNEL 1 y 3											
Fecha:	01/11/2012	CORD. X:	1'307.945	CROD. Y:	1'129.989	Altitud:	2.667				
Hora:	07:35	Hoja No.:	4	PK Actual:	X	Avance [m]:	X				
Tomado por:	Wilfredy Morales	Revisión por:	X	PK Anterior:	X	Azimut:	X				
LITOLOGÍA Y ALTERACIÓN		Calidad del Macizo Rocoso (Clasificación Q de Barton)									
Litología:	Neis No Alt	CLASIFICACIÓN	Valor	Descripción							
Dureza:	R5 - R6	RQD	35	Calidad del Macizo Rocoso es Mala							
Código muestra:	TW-004	Jn	12	3 familias o sets de diaclasas (bloques tetraedrales) y algunas aleatorias							
Tipo de muestreo:	Litológico	Jr	1,5	Discontinuidades generalmente rugosas a ligeramente rugosas y de formas planas							
Alteración:	Por Met. I -II	Ja	6	Algo de rellenos de limo-clay no blandos con espesores menores a 5 mm							
Mineralogía:	Hbl, Qtz, ± Plg, Bt y Esp	Jw	0,66	Fluencia con ocasional lavado del relleno de las discontinuidades							
Recolector:	Wilfredy Morales	SRF	2,5	Tensiones pequeñas cerca a superficie							
		Q	0,1925	Roca clasificada geomecánicamente como MUY MALA							
% SULFUROS											
Py	Cpy	Bo	X	Co	Mo	Cu	X	Mt	Ag	Au	
Presencia de Especlarita											
PROYECCIÓN GRÁFICA DEL AFLORAMIENTO					ESTEREOGRAFÍA						
DESCRIPCIÓN DEL AFLORAMIENTO											
<p>GEOLOGÍA (Litología, textura, mineralogía, color, tamaño de grano, alteración, dureza, etc).</p> <p>1) BANDA 1 -Neis Hornbléndico: con estructura bandeada neísica, textura Nematoblástica, de grano medio a fino, escala de dureza R5-R6 y grado de meteorización II (pero sin alteración hidrotermal). MINERALOGÍA: Hbl 85 %, Plg-Qtz 12% y Bt en un 3% aprox.</p> <p>2)BANDA 2 - Neis de Cuarzo-Plagioclasa: forma bandas neísticas félsicas, pero su estructura interna es masiva, con textura granoblástica de grano medio, el grado de meteorización es I (no presenta alteración hidrotermal) y dureza R6. MINERALOGÍA: Qtz 85, Plg 10% y Bt-Hbl en un 5%. En afloramiento se ven bandas bien definidas máficas y félsica, con una foliación definida como 254º/67º.</p>											
MAPEO ESTRUCTURAL											
DISCONTINUIDADES				Longitud	Espaciamiento	Alteración	Apertura	Relleno	Rugosidad	Forma	Agua
Set N°	Tipo de set	Dip (°)	Ddip (°)								
1	4	72	250	3	3	4	4	4	3	1	2
2	0	28	121	1	3	1	2	2	2	1	2
3	0	84	31	1	3 a 4	3	3	2	3	1	1
3	0	31	50								
3	0	87	354								
1	4	69	254								
3	0	20	83								
3	0	73	47								
1	4	73	276								
2	0	21	94								

Fuente: AUX Colombia SAS, 2012.



El primer paso en el estudio de un afloramiento debe ser la identificación del mismo y su descripción general: Localización, situación geográfica, accesos, extensión, características geométricas, etc. Debe indicarse si es un afloramiento natural o corresponde a una excavación y las condiciones en que se encuentra.

Después del primer y obligado paso de descripción general del afloramiento, y siguiendo el orden lógico del formato planteado para este estudio (figura 9), en los siguientes apartados se profundizará en características y propiedades para cada uno de los tres ámbitos de estudio para realizar una caracterización de macizos rocoso.

4.1.1. Caracterización de la matriz rocosa

Los aspectos que deben de ser descritos en campo son:

- **Identificación litológica**

Según Ramírez *et al.* (1991), este apartado comprende el estudio de clasificación y descripción de las rocas. También cita que el concepto de “roca” no se ha definido con tanta precisión como otros conceptos, como por ejemplo, el de mineral; por tanto, los límites que comprende este término no están bien determinados. Así, se puede considerar la roca como el elemento constructivo de la litósfera o, también, como un conjunto de agregados mono o poliminerale.

Teniendo en cuenta lo anterior las rocas litológicamente se clasifican en tres grandes grupos: ígneas, metamórficas y sedimentarias; y cada gran grupo tiene su propia sistemática de descripción y clasificación.



González et al. (2002), indica que la identificación de una roca se hace de manera visual, donde se establece su composición y su textura o relaciones geométricas de los minerales. A estos criterios descriptivos se suman a las características genéticas, cuando éstas pueden ser deducidas de la paragénesis mineral, composición química, forma y estructura del yacimiento, y de las relaciones temporales y espaciales con otras rocas.

Las observaciones más prácticas son: la composición mineralógica, la textura – estructura, forma y tamaños de cristales (rocas ígneas y metamórficas), color – transparencia y por último la dureza relativa (relacionada directamente con la densidad de la roca).

- **Meteorización de la matriz rocosa**

El grado de meteorización de una roca es una observación importante en cuanto que condiciona de forma directa sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumenta la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia.

Este proceso modifica la composición y/o la estructura de una roca situada en la superficie terrestre o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos

En la tabla 4, se indican los seis grados de meteorización considerados para rocas cristalinas principalmente cuarzofeldespáticas, donde se indican las seis denominaciones y los criterios empíricos de reconocimiento correspondientes a cada grado.



Tabla 4. Escala de meteorización de rocas cuarzofeldespáticas, según D. G. Moya.

Grado de meteorización	Denominación de la roca	Criterios de reconocimiento
I	Sana o fresca	Roca no meteorizada. Las micas y feldespatos están lustrosos.
II	Sana con superficies de las discontinuidades manchadas de óxidos	Las caras de las discontinuidades están manchadas o cuertas con hematita o limonita, pero el bloque de roca no está meteorizado
III	Moderadamente meteorizada	Claramente meteorizada a través de la fábrica que se observa por manchas de óxidos de hierro y ligera descomposición de los feldespatos, pero la resistencia es muy similar a la roca sana
IV	Muy meteorizada	Meteorización acusada de conjunto, pero con resistencia tal, que piezas de aprox. 25 cm ² de sección transversal no pueden romperse con la mano
V	Completamente meteorizada	Roca intensamente meteorizada con aspecto de suelo que puede romperse y desmenuzarse a mano, pero se puede reconocer todavía la fábrica original.
VI	Suelo residual	Suelo propiamente dicho, la roca original no es reconocible

Fuente: Ramírez *et al.*, 1991.

- **Resistencia de la matriz rocosa**

La resistencia de la matriz rocosa puede ser estimada en el afloramiento mediante índices de campo o a partir de correlaciones con datos proporcionados por sencillos ensayos de campo, como el ensayo de carga puntual PLT (utilizado en este estudio para los core) o el martillo Schmidt.

Los índices de campo permiten la estimación del rango de resistencia de la roca frente al martillo geológico. Los criterios para su identificación aparecen descritos en la tabla 5, y se aplicaron sobre la roca una vez limpiada la capa de alteración superficial.



Tabla 5. Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de rocas a partir de índices de campo, según la ISRM de 1981.

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación del rango de σ_c (Mpa)
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 a 1,0
R1	Roca muy blanda	La roca friable al golpear con la punta del martillo. Con la navaja se talla fácilmente.	1,0 a 5,0
R2	Roca blanda	Se talla con dificultad con la navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0 a 25
R3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25 a 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50 a 100
R5	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100 a 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

Fuente: González de Vallejo *et al.*, 1991.

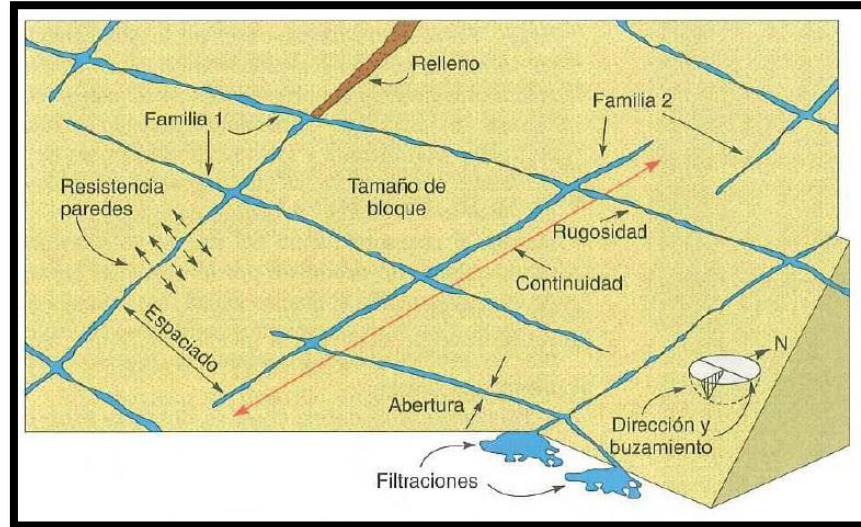
4.1.2. Descripción de las discontinuidades del macizo rocoso

González *et al.* (2002), indica que las discontinuidades condicionan de una forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocoso. La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados, y para su estimación es necesario definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad.

La descripción y medida de cada familia de discontinuidad incluye los siguientes parámetros: orientación, espaciado, continuidad o persistencia, rugosidad, resistencia de las paredes, abertura, relleno y filtraciones (Figura 10).



Figura 10. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades, según Hudson, 1989.



Fuente: González de Vallejo *et al.*, 2002, pag. 247.

- **Orientación**

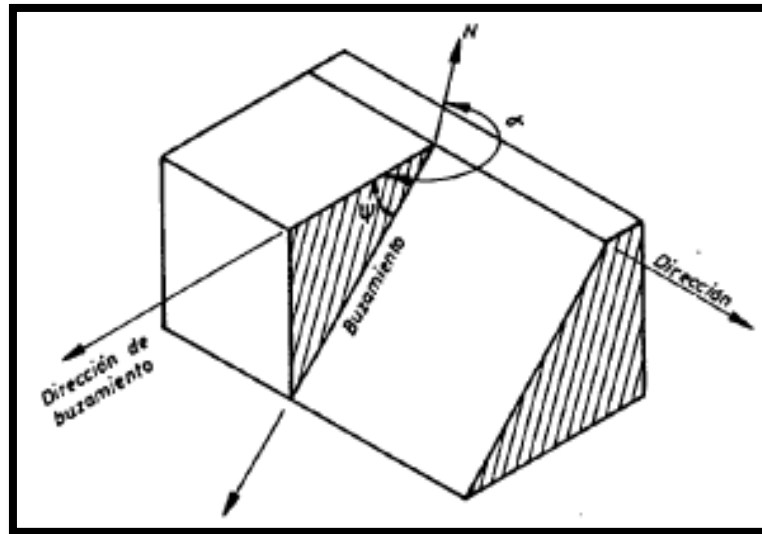
Las discontinuidades sistemáticas se presentan en familias o sets con orientaciones y características más o menos homogéneas. La orientación relativa y el espaciado de las diferentes familias de discontinuidad de un macizo rocoso definen la forma de los bloques que conforman el macizo. La orientación de las discontinuidades con respecto a la orientación de las estructuras y obras de ingeniería (vías, túneles, etc.) condicionan la presencia de inestabilidades y roturas a su favor.

La orientación de un determinado plano de discontinuidad en el espacio se define por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte geográfico) y por su buzamiento (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea). Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro.



Los rangos de valores posibles para la dirección del buzamiento (α) van desde 0° hasta 360° (circunferencia completa con referencia el norte geográfico y aumento en la dirección de las manecillas del reloj), mientras los rangos de valores para la magnitud del buzamiento (ψ) van desde 0° hasta 90° (medido en la vertical desde horizontal hasta vertical), en la figura 11 se ilustra gráficamente lo mencionado antes.

Figura 11. Representación esquemática de la medida de la orientación de planos estructurales.



Fuente: Ramírez *et al.*, 1991.

Los métodos de representación gráfica de la orientación de las diferentes familias de discontinuidades puede realizarse mediante:

- Proyección estereográfica, representando los polos o planos con valores medios de las diferentes familias o sets.
- Diagramas de rosetas, que permiten representar un gran número de medidas de orientación de forma cuantitativa.
- Bloques diagrama, permitiendo una visión general de las familias y sus orientaciones representativas.



- Símbolos en mapas geológicos, que indican los valores medios de la dirección de buzamiento y el valor del buzamiento para los diferentes tipos de discontinuidades (juntas, fallas, foliación, etc.).

- **Espaciado**

El espaciado entre los planos de discontinuidad condiciona el tamaño de los bloques de matriz rocosa y, por tanto, define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso, y su importancia con respecto a la influencia de las discontinuidades.

El espaciado se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Normalmente este valor se refiere al espaciado medio o modal de los valores medidos para las discontinuidades de la misma familia.

La medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de las discontinuidades, al menos de tres metros. Como norma general, la longitud de medida debe ser unas diez veces superior al espaciado. La cinta debe colocarse perpendicularmente a los planos, registrándose la distancia entre discontinuidades adyacentes.

El espaciado se describe según los términos de la tabla 6.

Tabla 6. Términos y rangos para evaluar el parámetro del espaciamiento de las discontinuidades.



Descripción	Espaciado en mm
Extramadamente junto	< 20
Muy Junto	20 a 60
Junto	60 a 200
Moderadamente Junto	200 a 600
Separado	600 a 2.000
Muy Separado	2.000 a 6.000
Extramadamente separado	> 6.000

Fuente: González de Vallejo *et al.*, 2002.

- **Continuidad**

La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente.

La medida de la continuidad se realiza con cinta métrica. Si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento. Las discontinuidades pueden o no terminar contra otra discontinuidad, debiendo indicarse en la descripción. Es importante destacar las familias más continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicionen principalmente los planos de rotura del macizo. Los rangos de continuidad se describen en la tabla 7. Por lo general, las discontinuidades singulares, como las fallas y los diques, suelen ser muy continuas, y representan los mayores planos de debilidad en el macizo rocoso, por lo que deben ser caracterizados y descritos con especial atención.

Tabla 7. Términos y rangos para evaluar el parámetro de la continuidad o persistencia de las discontinuidades.



Descripción de la continuidad	Longitud en m
Muy baja continuidad	< 1
Baja continuidad	1 a 3
Continuidad media	3 a 10
Alta continuidad	10 a 20
Muy alta continuidad	> 20

Fuente: González de Vallejo *et al.*, 2002.

- **Rugosidad**

La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos, τ , que para discontinuidades son cohesión puede ser estimada a partir de datos de campo y de expresiones empíricas, las segundas fueron utilizadas en el presente estudio en el trabajo de campo. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor del relleno si lo hay.

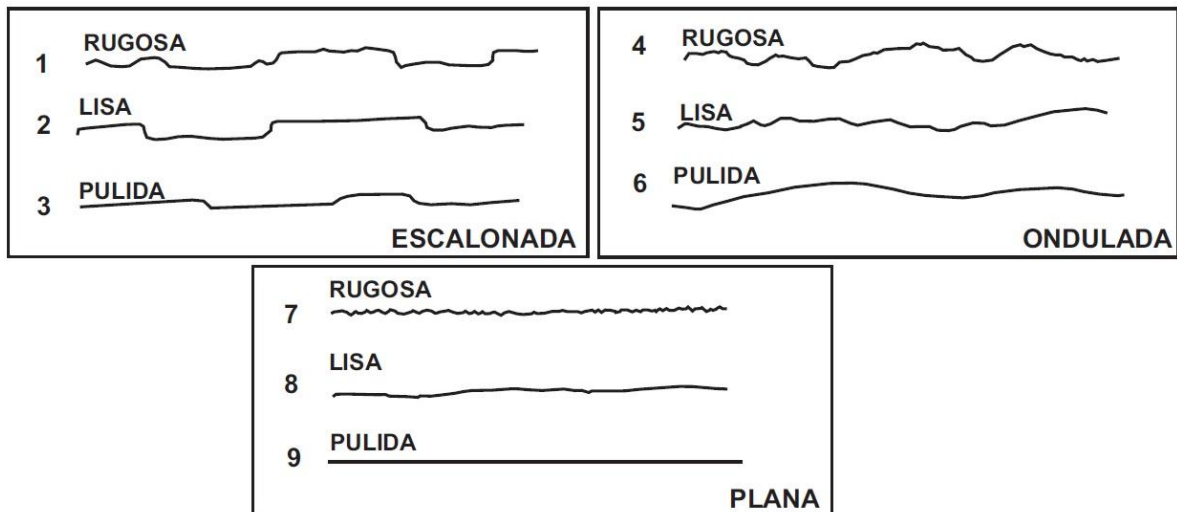
El termino rugosidad se emplea generalmente en sentido amplio para hacer referencia tanto a la **ondulación** de las superficies de discontinuidad, como a las irregularidades o **rugosidades** a pequeña escala de los planos, definidas en ocasiones como de primer y segundo orden respectivamente. La descripción de la rugosidad requiere, entonces, dos escalas de observación (figura 12):

- Primero a una escala decimétrica y métrica para estimar el grado de ondulación de las paredes: con superficies planas, onduladas o escalonadas.
- Segundo a una escala milimétrica y centimétrica para estimar el grado de rugosidad propiamente dicha o irregularidad: superficies pulidas, lisas o rugosas.



La rugosidad puede ser medida en campo con diversos métodos, dependiendo de la exactitud requerida, de la escala de medida o de la accesibilidad al afloramiento, incluyendo desde estimaciones cualitativas hasta medidas cuantitativas. El método más sencillo y rápido es la comparación visual de las discontinuidades con los perfiles estándar de rugosidad de la figura 12. Cualitativamente un plano de discontinuidad puede ser, por ejemplo, ondulado-liso, plano-rugoso u ondulado-rugoso.

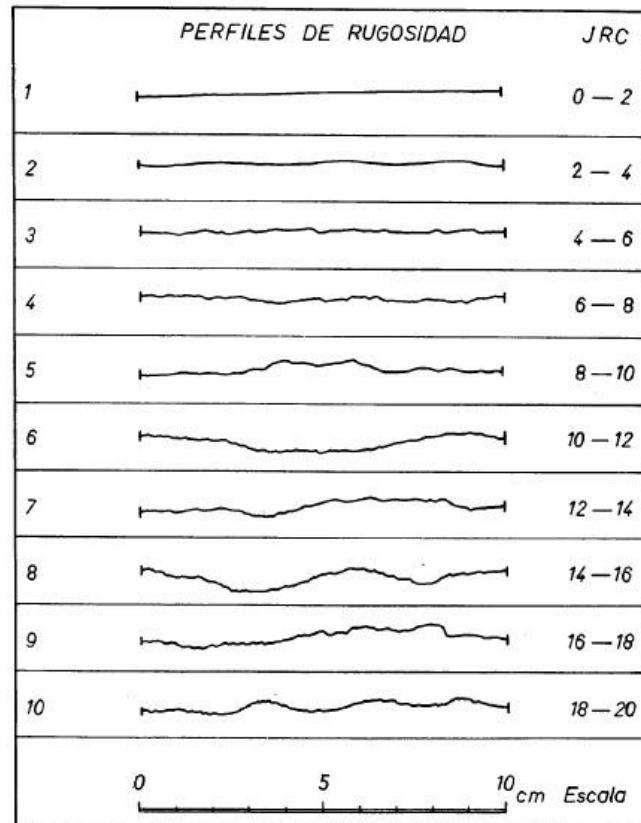
Figura 12. Perfiles de rugosidad. La longitud de los perfiles está en el rango entre 1 y 10 metros.



Fuente: Ramírez *et al.*, 1991.

En el caso de las mediciones de rugosidad en la segunda escala (centimétrica), se utiliza otra escala de rugosidad (figura 13), que presenta 10 perfiles de 10 centímetros cada uno, relacionados con el JRC, que es el coeficiente de rugosidad de las superficies de discontinuidades, este dato es utilizado para calcular la resistencia al corte de la discontinuidad (Barton y Choubey, 1977).

Figura 13. Perfiles de rugosidad. La longitud de los perfiles está cada 10 centímetros con los valores del JRC



Fuente: Ramírez *et al.*, 1991.

- **Resistencia de las paredes de las discontinuidades**

La resistencia de la pared de una discontinuidad influye en su resistencia al corte y en su deformabilidad. Depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia o no de relleno. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma de la matriz rocosa, pero generalmente debido a la meteorización de las paredes. Los procesos de alteración afectan en mayor medida a los planos de discontinuidad que a la matriz rocosa. Por lo cual, junto a la medida de la resistencia de las paredes de la discontinuidad debe ser estimado el grado de meteorización de la matriz rocosa.



La resistencia puede estimarse en campo con el **Martillo Schmidt**, aplicándolo directamente sobre la discontinuidad, siguiendo la metodología que se utiliza para estimar la resistencia de las paredes con este martillo. También esta estimación puede realizarse con el martillo geológico ya de manera semicuantitativa y no cuantitativa como con el Esclerómetro (Martillo de Schmidt), esta estimación utiliza los índices de campo (tabla 5), donde en general, la resistencia de la pared rocosa estará comprendida entre los grados R0 y R6.

- **Abertura**

La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe un relleno. Este parámetro puede ser muy variables en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso. Mientras que en superficie la abertura puede ser alta, ésta se reduce con la profundidad, pudiendo llegar a cerrarse. La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes. Los procesos de deslizamiento en la discontinuidad o de disolución pueden dar lugar a aberturas importantes.

Su medida se realiza directamente con una regla graduada en milímetros. Cuando la separación es muy pequeña se puede emplear un calibrador que se introduce en la abertura. Debe indicarse si la abertura de una discontinuidad presenta variaciones, realizándose medidas a lo largo de al menos 3 m. La descripción se realiza según la terminología de la tabla 8. Las medidas se realizaron para cada familia de discontinuidades, adoptando los valores medios más representativos de cada una de ellas.



Tabla 8. Términos y rangos para evaluar el parámetro de la abertura de las discontinuidades, según la ISRM en 1981.

Abertura	Descripción
< 0,1 mm	Muy cerrada
0,1 a 0,25 mm	Cerrada
0,25 a 0,5 mm	Parcialmente abierta
0,5 a 2,5 mm	Abierta
2,5 a 10 mm	Moderadamente Ancha
> 10 mm	Ancha
1 a 10 cm	Muy Ancha
10 a 100 cm	Axtremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

Fuente: González de Vallejo *et al.*, 2002.

- **Relleno**

Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe una gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables. La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que se reconocieron y describieron todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado. Es de especial cuidado el hecho de tener materiales blandos o alterados, ya que éstos pueden sufrir variaciones importantes en sus propiedades resistentes a corto plazo si cambia el contenido de humedad o si tiene lugar un movimiento a lo largo de las paredes de las discontinuidades desfavorables.

Las características más relevantes a tener en cuenta en la descripción de rellenos son: su naturaleza, espesor o anchura, resistencia al corte y permeabilidad (los dos últimos de forma indirecta o cualitativa).



Lo registrado normalmente en el área de interés son algunos rellenos principalmente de arcillas, limos y capas de óxidos bastante considerables.

- **Filtraciones**

El agua en el interior de un macizo rocoso se produce generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), por lo menos para nuestro caso, debido a que la matriz rocosa son rocas cristalinas (ígneo – metamórficas). Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenas como si aparecen limpias, siguen las descripciones de la tabla 9.

Tabla 9. Términos para la descripción de las filtraciones en discontinuidades, según la ISRM en 1981.

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Discontinuidades muy planas y cerradas. Aparece seca y no parece posible la circulación de agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Discontinuidades secas sin evidencia de flujo de agua.	Relleno húmedo pero sin agua libre.
III	Discontinuidades secas pero con evidencia de haber circulado agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Discontinuidades húmedas pero sin agua libre.	relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar el caudal en l/min).
V	Discontinuidades que rezumen, ocasionalmente goteo pero son flujo continuo.	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión).
VI	Discontinuidades con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min, y la presión).	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

Fuente: González de Vallejo *et al.*, 2002.



4.1.3. Parámetros del macizo rocoso

González *et al.* (2002), indica que para la caracterización global del macizo rocoso a partir de datos de campo (afloramientos, frentes, etc.), además de las descripción de sus componentes, la matriz rocosa y las discontinuidades, deben ser considerados otros factores representativos del conjunto tal como:

- **Número y orientación de las familias de discontinuidades**
- **Tamaño de bloque e intensidad de fracturación**
- **Grado de meteorización**

Algunos de estos parámetros se miden de igual manera como en la matriz rocosa, como lo es el grado de meteorización pero ahora para el macizo en general. Mientras la orientación de las familias ya no se toma uno o dos datos por familia, sino se toma una gran densidad de datos para todo el afloramiento.

La caracterización del número y tamaño del bloque, depende de la clasificación geomecánica a utilizar, para este caso en el siguiente apartado se explicaran como se miden y aplican estos parámetros según la clasificación por el índice de calidad Q de Barton de 1974-2000.



4.2. CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO Q PARA TÚNELES, SEGÚN BARTON (1974, 2000)

La descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades y de los parámetros del macizo rocoso, proporcionan los datos necesarios para la evaluación geomecánica global del macizo.

El sistema Q, es un método de clasificación de macizos rocosos muy utilizado, fue desarrollado en Escandinavia por Barton, Lien y Lunde en 1974, basándose en doscientos casos de estabilidad en excavaciones subterráneas, siendo su principal propósito establecer un índice para determinar la calidad del macizo rocoso en túneles (Carrillo, Rodríguez & Zúñiga, 2002).

Este sistema de clasificación de macizos rocosos permite establecer sistemas de sostenimientos para túneles y galerías, aplicación dada en AUX Colombia Ltda. Por esta razón se modelara utilizando métodos geoestadísticos los valores de la clasificación Q Barton, para conocer los sostenimientos directamente desde la interpolación de los datos de logging geotécnico.

El método de clasificación de Barton *et al.* (1974) se desarrolló para estimar la fortificación de túneles en función del índice Q de calidad geomecánica, obtenido a partir de 6 parámetros que tienen en cuenta una serie de características del macizo rocoso.

El índice Q se define como:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Dónde:



RQD: es el Rock Quality Designation.

Jn: Índice de diaclasado, que tiene en cuenta la fracturación, el número de sets de estructuras presentes en el macizo rocoso.

Jr: Índice de rugosidad, que tiene en cuenta, además de la rugosidad, la presencia de relleno y la continuidad de las juntas.

Ja: Índice de alteración de las paredes de las discontinuidades.

Jw: Coeficiente reductor, que se tiene en cuenta al considerar la presencia de agua.

SRF es el Sress Reduction Factor, tiene en cuenta al estado tensional en el macizo rocoso.

Los tres grupos formados con estos parámetros son:

RQD/Jn = representa el tamaño de los bloques.

Jr / Ja = representa la resistencia al corte entre los bloques.

Jw / SRF = representa la influencia del estado tensional.

El rango de variación de los parámetros es el siguiente:

RQD : entre 0 y 100.

Ja : entre 0.75 y 20.

Jn : entre 0.5 y 20.

Jw : entre 0.05 y 1.

Jr : entre 0.5 y 4.

SRF : entre 0.2 y 20.



Y el rango para el índice Q es el siguiente:

Valor máximo matemático = 5333.33333

Valor mínimo matemático = $3.125 \cdot 10^{-5}$

Los anteriores valores extremos no son coherentes con la realidad, ya que para ello se deben combinar: en el caso máximo, los mejores casos en los numeradores (valores máximos de RQD, Jr y Jw) al mismo tiempo que los mejores casos en los denominadores (valores mínimos de Jn, Ja y SRF); mientras, en el caso mínimo, los peores casos en los numeradores (valores mínimos de RQD, Jr y Jw) al mismo tiempo que los peores casos en los denominadores (valores máximos de Jn, Ja y SRF). En la tablas 10, 11 y 12, se muestran las tablas de rangos de clasificación geomecánica del Q de Barton, estimación de los parámetros para calcular el Q y correlación de los valores del Q con los sostenimientos requeridos, respectivamente.

Tabla 10. Rangos de clasificación de Barton para macizos rocosos, índice de calidad Q.

TIPO DE ROCA	VALOR DE Q
Excepcionalmente Mala	0,001 y 0,01
Extremadamente Mala	0,01 y 0,1
Muy Mala	0,1 y 1
Mala	1 y 4
Media	4 y 10
Buena	10 y 40
Muy Buena	40 y 100
Extremadamente Buena	100 y 400
Excepcionalmente Buena	400 y 1000

Fuente: simplificado de Barton *et al.*, 1974.



Tabla 11. Estimación de los parámetros que intervienen en el índice Q.

ÍNDICE DE DIACLASADO <i>J_n</i> (*)	VALOR	ÍNDICE DE RUGOSIDAD <i>J_r</i>	VALOR
Roca masiva	0,5 - 1,0	Diaclasas rellanas	1
Una familia de diaclasas	2	Diaclasas limpias (*)	
Id. con otras diaclasas ocasionales	3	- Discontinuas	4
Dos familia de diaclasas	4	- Onduladas, Rugosas	3
Id. con otras diaclasas ocasionales	6	- Onduladas, Lisas	2
Tres familia de diaclasas	9	- Planas, Rugosas	1,5
Id. con otras diaclasas ocasionales	12	- Planas, Lisas	1
Cuatro o mas familias , roca muy fracturada	15	Lisos o Espejos de fallas	
Roca triturada	20	- Ondulados	1,5
		- Planos	0,5
(*) En los emboques 2 * <i>J_n</i>		(*) O cuyas caras entran en contacto bajo la sollicitacion	

ÍNDICE DE ALTERACIÓN <i>J_a</i>	VALOR	COEFICIENTE REDUCTOR POR LA PRESENCIA DE AGUA <i>J_w</i>	VALOR	PRESION DE AGUA (kg/cm ²)
Diaclasas de paredes sanas	0,75 - 1	Excavaciones secas o con < 5 l/min localmente	1	< 1
Ligera alteración	2			
Alteraciones arcillosas	4	Afluencia media con lavado de algunas diaclasas	0,66	1 - 2,5
Con detritus arenosos	4			
Con detritus arcillosos preconsolidados	6	Afluencia importante por diaclasas limpias	0,5	2,5 - 10
Id. poco consolidados	8			
Id. expansivos	8 a 12	Ídem con lavado de diaclasas	0,33	2,5 - 10
Molinitos o patinas de roca y arcilla	6 a 12			
Molinitos o patinas de arcilla limosa	5	Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo	0,2 - 0,1	> 10
Molinitos o Patinas arcillosos gruesos	10 a 20			
		Ídem mantenida	0,1 - 0,05	> 10

PARAMETRO SRF	VALOR
Zonas debiles:	
Multitud de zonas débiles o molinitos	10
Zonas débiles aisladas con arcilla o roca descompuesta (cobertura ≤ 50m)	5
Ídem com cobertura > 50 m	2,5
Abundantes zonas débiles en roca competente	7,5
Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura ≤ 50m)	5
Ídem com cobertura > 50 m	2,5
Terreno en bloques muy fracturado	5
Roca competente:	
Pequeña cobertura	2,5
Cobertura media	1
Gran cobertura	0,5 - 2
Terreno expansivo:	
Con presión de hinchamiento moderada	5 a 10
Con presión de hinchamiento alta	10 a 15

Fuente: simplificado de Barton *et al.*, 1974.



Tabla 12. Valores del índice Q y su correlación con la calidad del macizo, y los recomendaciones de sostenimientos pertinentes para cada caso.

Clase de Roca	Rango de Q	Calidad	Fortificacion y Soporte Estimado
R1	$Q > 10$	Buena	Barra Helicoidal espaciada 1,5 * 1,5 (m); L= 3(m) - ARCO
R2	$1 < Q \leq 10$	Reguar	Barra Helicoidal espaciada 1,3 * 1,3 (m); Sh = 7(cm) + Malla tejida 10006 - ARCO
R3	$0,1 < Q \leq 1$	Mala	Barra Helicoidal espaciada 1,2 * 1,2 (m); gradiente a gradiente L= 3(m); Sh = 10(cm) + Malla tejida 10006
R4	$0,01 < Q \leq 0,1$	Muy Mala	Barra Helicoidal espaciada 1,0 * 1,0 (m); piso a piso L= 3(m); Sh = 12(cm) + Malla tejida 10006
R5	$Q < 0,01$	Extremadamente Mala o Zona de Falla	Barra Helicoidal espaciada 1,0 * 1,0 (m); piso a piso L= 3(m); Sh = 15(cm) + Arco de acero de 15 (cm), 40(Kg/m), espaciado entre 0,7 y 1 (m); Pernos parrilla L=6 a 12 (m) en todo el arco espaciado a 0,5(m)

Fuente: simplificado AUX, 2012.



4.3. DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA DE TESTIGOS DE NÚCLEOS DE PERFORACIÓN ADAMANTINA O LOGGING GEOTÉCNICO

Dempers *et al.*, menciona que los grandes volúmenes de datos geotécnicos son colectados durante la vida de un proyecto minero, pero estos datos son raramente colectados efectiva y exhaustivamente para representar las condiciones del macizo rocoso del proyecto. El propósito del logging geotécnico de núcleos es obtener una apreciación de las condiciones de la roca y aplicar estos conocimientos en el diseño de minas.

Existen actualmente diversas formas de coleccionar datos del logging geotécnico, por lo cual AUX estableció un método mediante formatos específicamente desarrollados para el proyecto. Esta metodología calcula los valores de las clasificaciones geomecánicas del Q de Barton y RMR, de manera individual y más precisa; pero los pozos utilizados para generar los modelos no poseen esta calidad de información, porque son pozos viejos logueados con la metodología anterior que será descrita a continuación. En la figura 14 y anexo 1, se muestra el formato en blanco utilizado para el logeo de testigos recuperados de perforaciones adamantinas profundas.

Para la descripción geotécnica de núcleos de perforación adamantina, estos se agrupan en intervalos que están en dominios geomecánicos o regiones de diseño con un tipo de roca en particular, el intervalo utilizado para el registro de logging geotécnico en el presente estudio fue de 1.52 metros en promedio, aunque este intervalo no se mantiene constante debido a variaciones geomecánicas del núcleo, como queda registrado en algunos formatos de logging anexos a este documento.



Esta metodología ha sido implementada con mucho éxito en diferentes entornos mineros a cielo abierto y subterráneos, a nivel mundial.

Se agrupa en dominios geotécnicos, los parámetros necesarios para las descripciones respectivas:

- Identificación del Hole (Núcleo), intervalos desde-hasta de los dominios geotécnicos,
- Tipo de roca,
- Recuperación de núcleo,
- Grado de meteorización,
- Resistencia estimada de la roca,
- Rock Quality Designation (RQD), que es la sumatoria de todas las longitudes de núcleos mayores a 10 cm,
- Número estimado de sets de discontinuidades (J_n),
- Grado y tipo de alteración o relleno de las paredes de las discontinuidades (J_a),
- Rugosidad de las paredes (JRC),
- Apertura,
- Clasificación final por RMR con correlación al Q de Barton,
- Comentarios adicionales.

Las tablas de puntajes para las respectivas clasificaciones son las mismas vistas en el apartado de clasificación Q de Barton, para grado de meteorización, resistencia estimada, RQD, J_n , J_a , JRC y Q.

Los puntajes dados a los parámetros de clasificación Q de Barton (J_n , J_a , J_r , etc), son los tomados por la clasificación RMR de Bieniawski (1989), se suman para un valor de clasificación de macizo rocoso RMR entre 0 y 100 puntos, y finalmente



con el valor de RMR se obtiene el valor de Q de Barton (1970), según la siguiente fórmula de correlación, definida por Bieniawski en 1984.

$$\mathbf{RMR = 9 \cdot \ln Q + 44 \quad (2)}$$

En la tabla 13 se muestra la combinación de los parámetros de entrada, con los valores o puntuaciones utilizadas en cada sistema de clasificación. Las puntuaciones mostradas para la clasificación del RMR, son las utilizadas en el logging geotécnico y posteriormente se suman para obtener el valor final de la clasificación RMR. Finalmente se procede a utilizar la fórmula (2) y calcular el valor de Q de Barton.

Por ejemplo, en el formato de descripción geotécnica del sondeo LB226, en el tercer intervalo descrito (entre 3.04 a 4.57 m de profundidad), se calcula el RMR sumando los parámetros resistencia, RQD, espaciamiento, condiciones de las discontinuidades y la presencia de agua, con lo cual:

$$\text{RMR} = 0 + 3 + 5 + 20 + 12 = 40 \text{ puntos}$$

$$Q = e^{(RMR-44)/9}, \text{ entonces, } Q = 0.641$$



Tabla 13. Valores combinados de los parámetros para las clasificaciones geomecánicas RMR, Q y RMI.

A. ROCKS		RMR	Q	RMI
A1. Compressive strength (σ_c) of intact rock		A1 =	-	$\sigma_c =$
Soil	$\sigma_c < 1$ MPa	0	Not included, except in $Q_c = Q \times \sigma_c / 100$	Use actual value of σ_c
Rock	a. Very low strength 1 – 5MPa	1		
	b. Low strength 5 – 25MPa	2		
	c. Moderate strength 25 – 50MPa	4		
	d. Medium strength 50 – 100MPa	7		
	e. High strength 100 – 250MPa	12		
	f. Very high strength > 250MPa	15		

B. DEGREE OF JOINTING		RMR	Q	RMI
B1. Rock quality designation (RQD)		A2 =	RQD =	-
a. Very good	RQD = 90 - 100	20	Use actual RQD value (min RQD = 10)	Not included
b. Good	75 - 90	17		
c. Fair	50 - 75	13		
d. Poor	25 - 50	8		
e. Very poor	< 25	5		
<i>An approximate correlation between RQD and Jv is: $RQD = 110 - 2.5J_v$ (J_v = jointing parameter)</i>				
B2. Block size		-	-	Vb =
Block volume (Vb)		Not included	Not included	Use actual value of Vb in m ³
<i>The block volume can be calculated from the Jv: $V_b = \beta \times J_v^{-3}$ For cubical block shapes $\beta = 27-32$, for slightly long or flat shapes $\beta = 32 - 40$, for long or flat shapes $\beta = 40 - 75$</i>				
B3. Joint spacing		A3 = ¹⁾	-	-
a. Very large spacing	Spacing >2m	20	Not included	Not included
b. Large spacing	0.6 - 2m	15		
c. Moderate spacing	200 - 600mm	10		
d. Small spacing	60 - 200mm	8		
e. Very small spacing	< 60mm	5		
¹⁾ Where more than one joint set occurs, the rating for the smallest spacing should be applied				

C. JOINTING PATTERN		RMR	Q	RMI
C1. Joint set number		-	Jn =	Nj =
No or few joints		Not included	0.75	6
a. 1 joint set	2		3	
b. 1 joint set + random joints	3		2	
c. 2 joint sets	4		1.5	
d. 2 joint sets + random joints	6		1.2	
e. 3 joint sets	9		1	
f. 3 joint sets + random joints	12		0.85	
g. 4 joint sets or more; heavily jointed	15		0.6	
h. Crushed, earth-like	20		0.5	
C2. Orientation of main joint set		B =	-	Co =
a. Very favourable	0	Not included	1	
b. Favourable	-2		1	
c. Fair	-5		1.5	
d. Unfavourable	-10		2	
e. Very unfavourable	-12		3	



D. JOINT CHARACTERISTICS		RMR	Q ¹⁾		RMI		
D1. Joint smoothness (small scale roughness) (called 'roughness' in the RMR)		A4c =	(js =)		js =		
a. Very rough		6	2		2		
b. Rough or irregular		5	1.5		1.5		
c. Slightly rough		3	1.25		1.25		
d. Smooth		1	1		1		
e. Polished		0	0.75		0.75		
f. Slickensided		0	0.5		0.5		
D2. Joint undulation or waviness (large scale roughness)		-	(jw =)		jw =		
a. Discontinuous joints		Not included	4		4		
b. Strongly undulating			2.5		2.5		
c. Moderately undulating			2		2		
d. Slightly undulating			1.4		1.4		
e. Planar			1		1		
¹⁾ Joint roughness number Jr = js x jw Note: Jr = js x jw = 1 for filled joints							
D3. Joint alteration or weathering		A4e =	Ja =		jA =		
a. Healed or welded joints		6	0.75		0.75		
b. Unweathered, fresh joint walls		6	1		1		
c. Slightly weathered joint walls (coloured, d. stained)		3	2		2		
e. Altered joint wall (no loose material)		0	4		4		
f. Coating of friction materials (silt, sand, etc.)		1	3		3		
g. Coating of cohesive materials (clay, chlorite, etc.)		0	4		4		
Filled joints		0	See below		See below		
Filled joints (t = joint thickness)		A4d =		Ja =		jA =	
		t < 5mm	t > 5mm	wall contact ¹⁾	no wall contact ²⁾	t < 5mm	t > 5mm
No filling		6	-	-	-	-	-
h. Friction materials (silt, sand, etc.)		5	2	4	8	4	8
j. Hard, cohesive materials (clay, talc, chlorite)		4	2	6	8	6	8
l. Soft, cohesive materials (soft clay)		2	0	8	12	8	12
n. Swelling clay materials		0	0	10	18	10	18
¹⁾ Wall contact before 10cm shear; ²⁾ No contact when sheared; Note: Q and RMI apply a combination of joint weathering and infilling, while RMR has input of both weathering and infilling							
D4. Joint length		A4a =		-		jL =	
a. Crack ¹⁾ (irregular break)	Length < ~0.3m	8		Not included		5	
b. Parting (very short, thin joint)	< 1m	6				3	
c. Very short joint	0.3 – 1m	4				2	
d. Short joint	1 – 3m	2				1.5	
e. Medium joint	3 – 10m	1				1	
f. Long joint	10 – 30m ²⁾	0				0.75	
g. Filled joint, or seam ³⁾	> 10m	0				0.5	
¹⁾ "Crack" has been introduced in this table; ²⁾ Length 10 – 20 m is applied in the RMR; ³⁾ Used in cases where most joints in the location are filled Persistence (continuity) of joints in the RMI system has been replaced by 'Discontinuous joints' in Table D2							
D5. Joint separation or aperture (A)		A4b =		-		-	
a. Very tight	None	6		Not included		Partly included in the input for 'interlocking of structure'	
	A < 0.1mm	5					
b. Tight	0.1 – 0.5mm	4					
	0.5 – 1mm	1					
c. Moderately open	1 – 2.5mm	1					
	2.5 – 5mm	0					
d. Open	5 – 10mm	0					
	10 – 25mm	0					
e. Very open	10 – 25mm	0					



E. INTERLOCKING OF ROCKMASS		RMR	Q	RMi
Compactness of structure		-	-	IL =
a. Very tight structure	Undisturbed rock mass	Not included	Not included	1.3
b. Tight structure	Undisturbed rock mass with some joint sets			1
c. Disturbed / open structure	Folded / faulted with angular blocks			0.8
d. Poorly interlocked	Broken rockmasses with angular and rounded blocks			0.5
<i>Note: Interlocking has been introduced in this table, based on its effects used in the GSI system</i>				

F. GROUND WATER CONDITIONS			RMR	Q	RMi
Water inflow to tunnel (q in litres/min) or water pressure (p_w)			A5 =	Jw =	GW =
a. Dry or damp	q = 0	$p_w < 1 \text{ kg/cm}^2$	15	1	1
b. Wet or small seeps	q < 10	$p_w = 1-2.5 \text{ kg/cm}^2$	10	0.66	
c. Dripping	q = 10-25	$p_w = 2.5-10 \text{ kg/cm}^2$	7	0.5	2.5
d. Gushing/material outwashing	q = 25-125		4	0.3	
e. Flowing, decaying with time	q > 125	$p_w > 10 \text{ kg/cm}^2$	0	0.15	-
f. Large, continuous inflow			-	0.08	-
<i>NOTE! GW – is related to groundwater's influence on rockmass stability</i>					

G. ROCK STRESSES (around tunnel)		RMR	Q	RMi
G1. Stresses below rockmass strength ($\sigma_\theta < \sigma_{cm}$)		-	SRF =	SL =
a. Very low stress level (as in portals)		Not included	2.5	0.1
b. Low stress level				0.5
c. Medium stress level				1
d. High stress level				0.67
G2. Overstressing; stresses > rockmass strength ($\sigma_\theta > \sigma_{cm}$)		-	SRF =	CF= RMi / σ_θ
in massive, brittle rocks	e. Moderate slabbing after >1 hr	Not included	25	0.75
	f. Slabbing and rock burst after few minutes		100	0.5
	g. Heavy rock burst		300	0.2
in deformable rocks	h. Mild squeezing		10	0.75
	i. Heavy squeezing		20	0.5
	σ_θ = tangential stresses around the opening; σ_{cm} = RMi = compressive strength of rock mass			

H. WEAKNESS ZONES *)		RMR	Q	RMi
H1. Type of weakness zone		-	SRF =	-
a. Multiple weakness zones	any depth	Weakness zones and shears are not explicitly included in RMR	10	(Zone or shear characteristics are included in the other input parameters)
b. Single weakness zone	depth < 50m		5	
c. Single weakness zone	depth > 50m		2.5	
d. Multiple shear zones	any depth		7.5	
e. Single shear zone	depth < 50m		5	
f. Single shear zone	depth > 50m		2.5	
g. Loose, open joints	any depth		5	
h. Heavily jointed ("sugar cube")	any depth		5	
H2. Size of the zone		-	-	Tz =
Thickness or width of the zone (Tz)		Not included	Not included	Use width of zone in m
H3. Orientation of zone related to excavation		-	-	Coz =
a. Very favourable		Not included	Not included	1
b. Favourable				1
c. Fair				1.5
d. Unfavourable				2
e. Very unfavourable				3
<i>*) Most weakness zones should be especially evaluated, together with the use of engineering judgement</i>				

Fuente: Palmström, 2.009.



4.4. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN GEOMETRICA - IDW

En estadística la interpolación es usada para estimar valores desconocidos a partir de una serie de datos conocidos y ponderados (Murillo *et al.*, 2012). En este estudio se realiza la interpolación espacial determinística aplicando el método geométrico o matemático de la distancia inversa o IDW por sus siglas en inglés, para la estimación de la calidad geomecánica del macizo rocoso a partir de los datos de descripción geotécnica de testigos. Se seleccionó este método por su relativa sencillez, presentar resultados bastante cercanos a la realidad y algunas aplicaciones ambientales en las que este método se ha comparado con el método geoestadístico de kriging ordinario han arrojado resultados muy similares, por lo anterior los métodos geoestadísticos no se utilizarán, pero se recomendará su posterior aplicación, para comparar los resultados obtenidos en esta investigación.

El método requiere tres pasos obligatorios:

- Definición de los bloques (3D) sobre el volumen de macizo rocoso a modelar (interpolar).
- Estimación de los pesos a aplicar para cada cubo del grupo de bloques en función de los criterios definidos por el método.
- Cálculo del valor de cada cubo.

Como se ha mencionado antes, los datos a partir de los cuales se realiza la interpolación, son los datos provenientes del logueo de núcleos de perforación adamantina profunda, por lo tanto estos datos poseen una gran incertidumbre y fuentes de error debido a: transporte de las cajas porta-núcleos o porta-testigo causando una sobre fracturación mecánica de la núcleos, diferencias de criterios de los geólogos encargados de describir los testigos, mayor grado de meteorización producido por el inadecuado almacenamiento de los núcleos, entre otras causas.



4.4.1. Método de interpolación de la distancia inversa (IDW)

Pazmiño (2012), define este método consiste en dar más peso o importancia a los datos que se encuentran espacialmente más cercanos al punto de estimación y por ende menos a los datos que se encuentren más lejanos; entonces, el peso es inversamente proporcional a la distancia desde la muestra (dato) hasta el punto a estimar. El valor que se desea encontrar (en el punto requerido) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} * v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (3)$$

Dónde:

d_i son las distancias de cada uno de los sitios con datos (1 hasta n) hasta el punto de interés.

v_i son los valores de datos, en este caso serán datos de parámetros geotécnicos y de clasificación geomecánica.

v es el valor a estimar.

Para calcular el valor por ejemplo del Q de Barton (v) en un punto 0 o punto de interés, solo basta realizar las operaciones sugeridas en la ecuación (3).

El estimador IDW dado por la ecuación (3) puede ser fácilmente adaptado para incluir un extenso rango de estimaciones. Además de utilizar los pesos inversamente proporcionales a la distancia, se puede hacer estos pesos inversamente proporcionales a cualquier exponente de la distancia:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} * v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

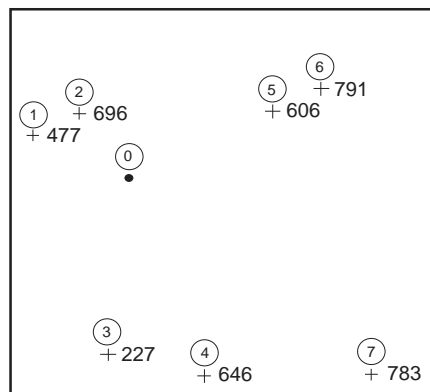


El exponente p que se elige es tres.

Los diferentes exponentes p que se eligen, resultarán en diferentes estimaciones. Mientras p decrece, los pesos de las muestras se asemejan más; y si el valor de p se incrementa, los pesos individuales incrementan sus diferencias, provocando que el valor en el punto estimado sea mayormente influenciado por los datos de perforación más cercanos. Tradicionalmente, la elección más común para el exponente del IDW es el valor de 2, pero no necesariamente el cálculo con el exponente cuadrático se obtienen los mejores resultados, ya que la elección del exponente p es arbitraria; y la tradicional popularidad del exponente 2 se debe, en parte, al hecho de que ésta elección involucra pocos cálculos y brinda sin embargo estimaciones de gran eficiencia (Isaaks y Srivastava, 1989). En estimación de leyes y calidad geomecánica el exponente p oscila entre 1 y 3.

4.4.2. Ejemplo de interpolación por el método IDW

Para mostrar a manera de ejemplo académico, se presenta el siguiente ejercicio:



En la tabla 14 se encuentran consignadas la coordenadas y valores de muestras para el ejemplo académico (Tomado Pazmiño, 2010; ejercicio de Isaaks, E. y Srivastava, R. 1989).



Tabla 14. Tabla de coordenadas y valores de muestra.

	Ejemplo N°	X (gramos Este)	Y(grados Norte)	V (precipitación)
0	0	65	137	
1	225	61	139	47
2	437	63	140	696
3	367	64	129	227
4	52	68	128	646
5	259	71	140	606
6	436	73	141	791
7	366	75	128	783

En la Tabla 15 se presenta el peso que cada estación tiene para calcular la precipitación en el punto de interés o punto 0 (65E, 137N).

Luego, en la Tabla 16 se presenta la precipitación obtenida en el punto 0, según diferentes exponentes aplicados en este método, los exponentes que se muestran a continuación son los utilizados en la bibliografía original, pero pueden ser variados como el usuario prefiera.

Tabla 15. Tabla de los pesos calculados por el método IDW.

	Ejemplo N°	X	Y	V	Distancia de 65E, 137N	1/di	(1/di)/(Σ1/di)
1	225	61	139	47	4.5	0.222222	0.208775552
2	437	63	140	696	3.6	0.277778	0.26096944
3	367	64	129	227	8.1	0.123457	0.115986418
4	52	68	128	646	9.5	0.105263	0.098893682
5	259	71	140	606	6.7	0.149254	0.140222386
6	436	73	141	791	8.9	0.11236	0.105560672
7	366	75	128	783	13.5	0.074074	0.069591851
						Σ(1/di)=	1.064407

Tabla 16. Tabla del efecto del exponente del método IDW.



No. Ejemplo	V	$\frac{1/d_i^p}{\sum 1/d_i^p}$					
		p = 0,2	p = 0,5	p = 1,0	p = 2,0	p = 5,0	p = 10,0
1	477	0.1564	0.1767	0.2088	0.2555	0.2324	0.0967
2	696	0.1635	0.1975	0.261	0.3993	0.7093	0.901
3	227	0.139	0.1317	0.116	0.0789	0.0123	0.0003
4	646	0.1347	0.1216	0.0989	0.0573	0.0055	0.0001
5	606	0.1444	0.1448	0.1402	0.1153	0.0318	0.0018
6	791	0.1364	0.1256	0.1056	0.0653	0.0077	0.0001
7	783	0.1255	0.102	0.0696	0.0284	0.001	0
	\hat{v}	601	597	594	598	637	675

Fuente: Pazmiño, 2010.

El efecto que tiene el exponente del método IDW en los pesos de las muestras y en la estimación de la precipitación en el punto 0 (\hat{v}). Los mejores resultados se obtienen generalmente con los exponente 2 y 3, de acuerdo con lo observado en diversos casos de aplicación de este método de interpolación.

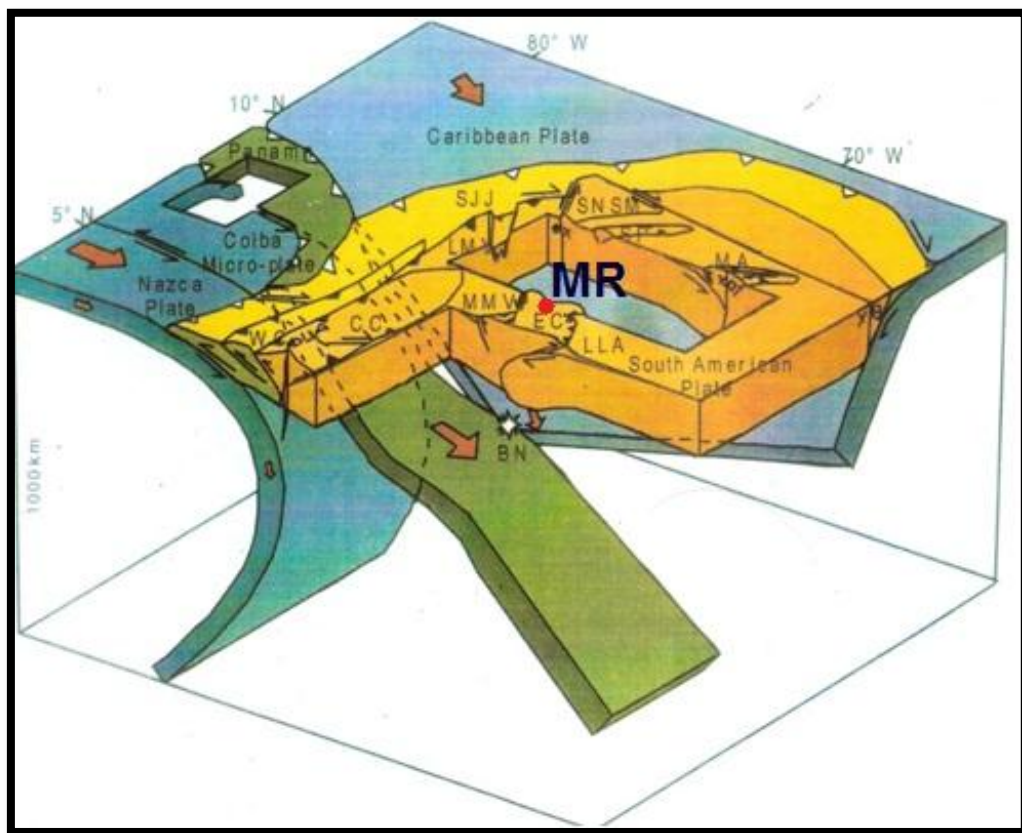


5. MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO REGIONAL

5.1. TECTÓNICA

El nororiente colombiano de Los Andes es un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico; su conformación está relacionada con la interacción de las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramérica (figura 15). El área de Santander por encontrarse dentro de este dominio, despierta gran interés y genera discusiones sobre su origen y su conformación geológica (Etayo *et al*, 1983).

Figura 15. Bloque esquemático indicativo 3D de la geometría y cinemáticas de las placas litosféricas debajo de la Cordillera Oriental y Noreste Colombiano.

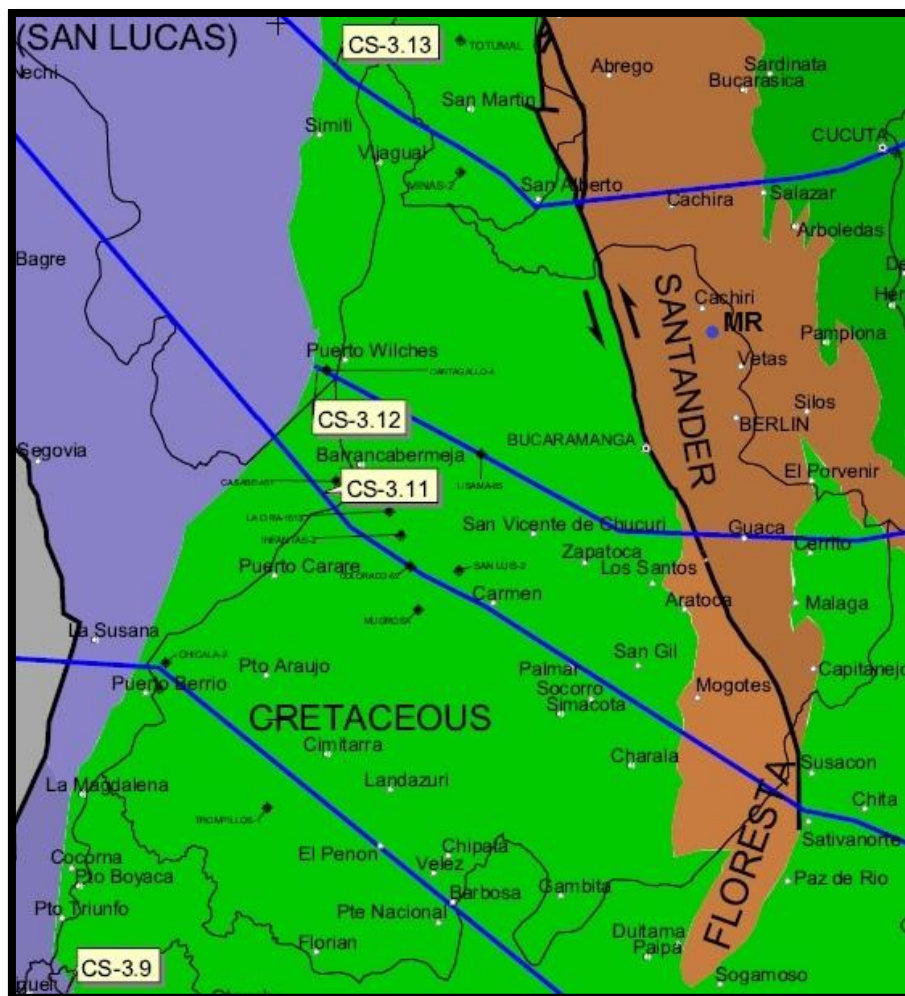


Fuente: Taboada *et al*, 1999.



Existen interpretaciones relacionadas con la aplicación del concepto de “terrenos geológicos o estratigráfico-tectónicos”, plasmado en el Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia (Etayo *et al*, 1983), en donde el territorio Noreste del Departamento de Santander (al Este de la Falla Bucaramanga) forma parte del “Terreno Santander o Macizo de Santander”. Estos conceptos son los aplicados en esta investigación (figura 16).

Figura 16. Mapa del Departamento de Santander donde se muestran los tres Terrenos tectónicos que lo conforman, se identifica con el punto azul la ubicación de macizo rocoso (MR) de interés, identifica también la falla regional más importante la Falla Bucaramanga.



Fuente: López, 2003.



5.1.1. Terreno Santander

Según el Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia el macizo rocoso del presente estudio se encuentra dentro del: **Terreno Santander o Macizo de Santander, dentro de la Provincia Tectónica Grenvilliana.**

5.1.2. Litología

METAMORFICAS: Neises félsicos, e intrusivos sintectónicos intermedios, anfibolitas y esquistos pelíticos del Proterozoico (Neis de Bucaramanga); sedimentitas pelíticas, samíticas y calcáreas metamorfoseadas en facies esquistos verdes-anfibolita baja, durante el Paleozoico (Formaciones Silgará y Floresta Metamorfoseada).

IGNEAS: Rocas plutónicas ácidas a intermedias jurásicas; vulcanitas ácidas a intermedias, y diques básicos (diabasas a basaltos), del límite Jura-Cretácico.

SEDIMENTARIAS: Sedimentitas rudáceas, pelíticas, calizas fosilíferas, las dos últimas del Devónico – Pérmico, que reposan discordantemente sobre el basamento ígneo-metamórfico.

5.1.3. Límites

N: Falla de Arena Blanca.

W: Falla Bucaramanga

SE: Falla Soapaga-Servitá



5.1.4. Estilo Estructural

Fallamiento de bloques.

5.1.5. Estilo Estructural

- Formación Jordán (Jurásico Superior).
- Formación Bocas (Jurásico) – (Formación Montebel).
- Formación Tiburón – Formación Diamante (Pérmico).
- Formación Floresta.
- Floresta Metamorfoseado (Ordovícico – Silúrico?).
- Formación Silgará (Ordovícico).
- Neis de Bucaramanga (Neoproterozoico).

5.1.6. Mineralizaciones y Depósitos Minerales

Pórfido cuprífero tipo Clímax (Mo – Cu). Depósitos epigenéticos filonianos: Au – U – Ag – Zn. Sulfuros masivos – volcánicos exhalativos en la Formación Silgará. Pegmatitas simples – Mica – Fluorita – Cobre tipo Red Beds. Fluorita y Barita en finoles (El. Pescadero – Formación Los Santos).

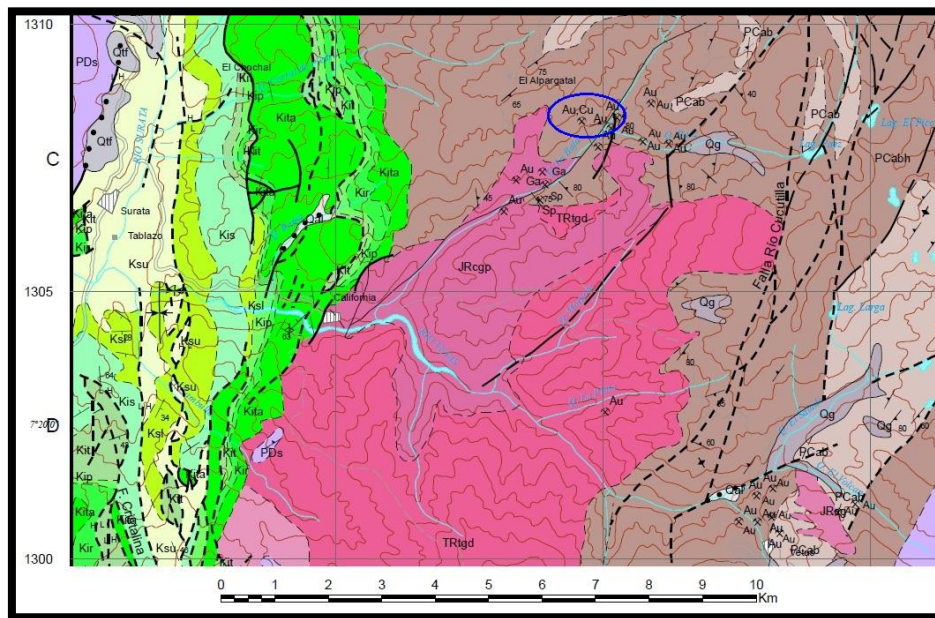


5.2. GEOLOGÍA REGIONAL

En el área de estudio, se identificaron regionalmente las unidades litoestratigráficas de edades Proterozoico hasta cenozoicas aflorantes, y son las siguientes: Neis de Bucaramanga, Formación Silgará, Plutón de Páramo Rico, Batolito de Santa Barbará, las Formaciones sedimentarias de Los Santos, Rosa Blanca, La Paja, Tablazo, Simiti, La Luna, Umir y los Depósitos Aluviales-Coluviales-Glaciares Recientes (figura 17).

Debido a que se tienen muchas unidades litológicas en la región cerca al área de interés del estudio, serán descritas solo las que tiene incidencia en la caracterización geología del área del macizo rocoso de interés. El mapa original de INGEOMINAS se encuentra en los anexos para una mejor visualización del mapa y la leyenda geológica.

Figura 17. Mapa geológico regional de los municipios de Suratá y California, la elipse azul es el área correspondiente al presente proyecto.



Fuente: INGEOMINAS, 1973.



A continuación se describen las características de las anteriores unidades, tales como: definición de la unidad, descripción geológica de la Unidad, petrografía, edad y correlaciones, de acuerdo con la información disponible. Se han actualizado los códigos de las unidades litoestratigráficas.

5.2.1. Neis de Bucaramanga (MP-NPb)

Ward propuso el nombre de Neis de Bucaramanga para una secuencia estratificada de rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico que consisten principalmente de paragneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo; esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico y anfibolita. El Neis de Bucaramanga también incluye zonas de migmatita de dos tipos: una en la cual el paragneis está mezclado con rocas granítica néisica y otra, donde ambos están cortados por muchas masas pequeñas de granito no foliado de edad mucho más joven. Se considera como localidad tipo el frente montañoso justamente al este de la ciudad de Bucaramanga.

- **Distribución**

El Neis de Bucaramanga aflora en tres fajas en la mitad sur de los Cuadrángulos H-12 y H-13. La más occidental, llamada en el boletín (INGEOMINAS, 1973) la faja de Bucaramanga, está al este de la falla del mismo nombre, en las cercanías a la ciudad. Se extiende hacia el norte, con una amplia zona de contacto, hasta el Batolito de Rionegro. Hasta el noreste, está cubierta por las rocas metamórficas de grado más bajo de la Formación Silgará. El lado oriental, está limitado por el Batolito de Santa Bárbara y termina en punta hacia el sur entre este batolito y la Falla Bucaramanga en el área de Cepitá, donde aparece al oeste de la misma falla. Más al sur, en el Cuadrángulo I-13, el neis aflora en alargados y delgados



techos pendientes colmados de diques a lo largo del borde este del Batolito de Mogotes.

La segunda faja del Neis de Bucaramanga, denominada faja Central, se extiende desde el área de Berlín, en la parte norte de la plancha 110 hacia el norte, más allá del área correspondiente a dicha plancha; y desde al área California-Cachirí hasta el área de Morro Nevado, al oeste de Mutiscua. Hacia el oeste, está cubierta por rocas sedimentarias del Mesozoico. Hacia el este y sur, está cubierta por las rocas de más bajo grado de la Formación Silgará. En el área de Tona, esta faja está separada de la de Bucaramanga hacia el suroeste, por intrusiones más jóvenes, por la cubierta sedimentaria suprayacente, por ortogneisy por rocas de grado ligeramente más bajo de la Formación Silgará.

La tercera y la más pequeña del Neis de Bucaramanga, denominada faja Oriental, tiene rumbo norte cerca del borde este del área cartografiada en el Cuadrángulo H-13, cerca de Chitagá y al sur de Pamplona. Aquí el neis ocurre en bloques fallados y separados.

- **Descripción**

Los tipos de roca en las tres fajas del Neis de Bucaramanga son más o menos semejantes, aunque difieren en su proporción. El neis de la faja de Bucaramanga está bien expuesto a lo largo de la carretera Bucaramanga-Pamplona y en la de Bucaramanga-Suratá. El neis consiste en metapelitas, semipelitas y metareniscas intercaladas con capas delgadas locales de rocas calcosilicatadas y mármol. El neis hornbléndico y la anfibolita están subordinados y restringidos a zonas cercanas a los horizontes calcosilicatados. La estratigrafía detallada del neis no fue establecida. La magnitud de la estratificación en el paragneis varía ampliamente, pero la estratificación composicional total es de unos centímetros a pocos metros de gruesos.



Capas de esquistos y neis pelítico alternan con estratos de metareniscas y zonas más amplias principalmente pelíticas o arenáceas, alternan entre sí. El neis pelítico contiene Sillimanita y cordierita. Las metareniscas son principalmente neis de biotita-feldespato-cuarzo y cantidades menores de cuarcita biotítica con delgadas separaciones micáceas que contienen Sillimanita. Capas delgadas de cuarcita gris ocurren esparcidas en las zonas arenáceas. Una banda de roca con epidota-anfíbol en el neis situado al este de Bucaramanga, puede trazarse hacia el sur hasta donde está cortada por la Falla de Bucaramanga, entre Bucaramanga y Piedecuesta. Esta banda puede coincidir con una angosta zona de mármol de mármol y de rocas calcosilicatadas que llevan diópsido, expuestas en el risco entre los ríos Suratá y Tona. Afloran también capas de anfibolita y roca calcosilicatada hacia el norte a lo largo de las pendientes sobre el lado oeste del río Suratá.

- **Edad y Relaciones Estratigráficas**

El Neis de Bucaramanga encaja todas las rocas ígneas y metaígneas conocidas en las áreas cartografiadas (H-12 y H-13) y parece, por lo menos en parte, infrayacer la Formación Silgará. Esta es total o parcialmente, la unidad de roca más antigua de toda la región correspondiente a los Cuadrángulos H-12 y H-13. Una muestra de roca total de neis biotítico de un corte en la carretera de Berlín a Vetas, dio una edad Rb/Sr, roca total de 680 ± 140 m.a. Esta muestra tiene un margen de error considerable y podría ser tan joven como el Cámbrico. Por otra parte, una edad más antigua puede haber sido variada por eventos subsiguientes. La hornblenda de una muestra de neis hornbléndico tomada cerca de Ocaña en el Neis de Bucaramanga, oeste de la Falla de Bucaramanga, dio una edad K/Ar de 945 ± 40 m.a. Esta edad es claramente Proterozoica. Tchanz (1968) cita una edad de 940 ± 34 m.a. de una granulita hornbléndica del lado occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. Otras edades Proterozoicas de la Sierra Nevada y de



Venezuela Occidental, sin embargo, están alrededor de 1300 m.a. Granitos precámbricos en el río Guaviare de los Llanos Orientales de Colombia dan edades de unos 1.205 m.a. (Pinsonet *al.*,1962).

El Neis de Bucaramanga puede reflejar un ciclo de la orogenia Grenvilliana, tentativamente colocada alrededor de 940-945 m.a., que es más joven que el registrado al norte y al este.

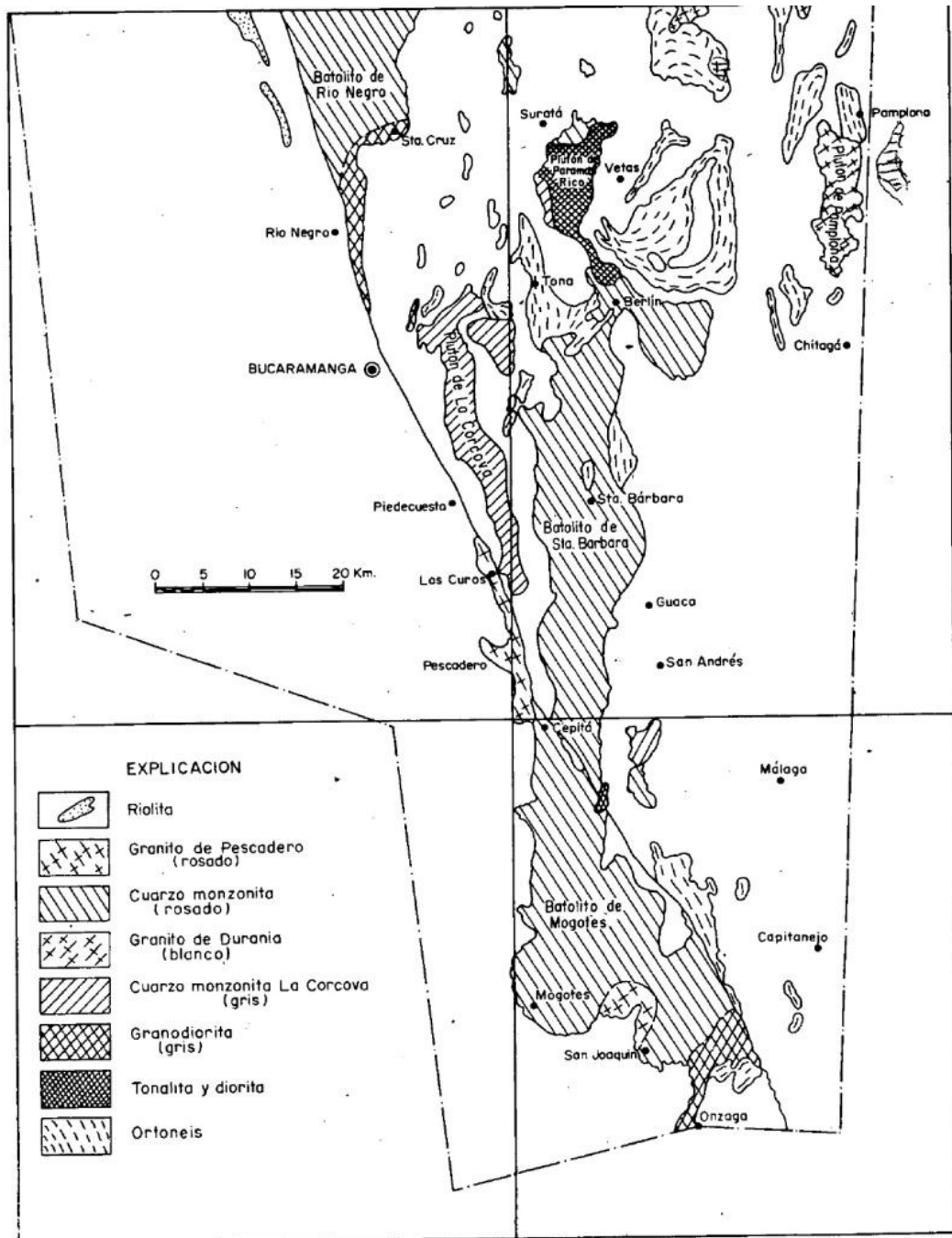
El contacto del Neis de Bucaramanga con la suprayacente Formación Silgará no hay podido ser determinada con certeza.

5.2.2. Tonalita y Granodiorita del Plutón de Páramo Rico (Ttgd)

El Plutón de páramo Rico que cubre un área de cerca de 50 Km² se encuentra en el centro del páramo del mismo nombre y al este de la Plancha 110. El apéndice sur al norte de Berlín (Figura 18) está limitado principalmente por fallas.

El Plutón está compuesto casi en su totalidad, por tonalita y granodiorita. Pequeños stocks de cuarzomonzonita, aplita y pórfidos en las esquinas suroeste y noroeste respectivamente, no se consideran parte de este Plutón. La granodiorita predomina en la parte sur, mientras la tonalita lo hace en la parte norte. El contacto con el Batolito de Santa Bárbara se encuentra cubierto. El Plutón consiste en tonalita gris de grano medio a grueso y granodiorita. Afloramientos accesibles se observan en la carretera Berlín-Vetas, unos 5 Km al norte del primer municipio y también cerca de California, donde la roca fresca aflora en las orillas del río Vetas, debajo de esta población.

Figura 18. Distribución de las rocas ígneas en el Macizo de Santander, según el Inventario Minero Nacional.



Fuente: Ward, INGEOMINAS, 1973.

El contacto de la tonalita y granodiorita con la Cuarzomonzonita del Batolito de Santa Bárbara no está expuesto. La primera de estas intruye claramente al Neis de Bucaramanga en el área de Páramo Rico y está cubierto inconformablemente



por la Formación Los Santos, de edad cretácico inferior. Diques de Alaskita, aplita y de la cuarzomonzonita de la Corcova cortan la tonalita, pero no se observaron diques de la cuarzomonzonita de Santa Bárbara o del granito de Pescadero. Cerca de California, la tonalita está cortada por cuarzomonzonita, aplita y pórfido cuarzoso. Masas pequeñas de tonalita néisica están expuestas en los cortes de la carretera Berlín-Vetas, al oeste del último municipio. Estas son probablemente apófisis de la masa principal de tonalita. En la parte norte del Plutón, la roca es de grano medio, algo más equigranular y predominantemente más tonalítica que granodiorítica.

En sección delgada la roca es hipidiomórfica y contiene plagioclasas tabulares subhedrales, no zonada hasta débilmente zonada, con maclamiento complejo; hornblenda en grandes subhedros; biotita de color verde marrón, cuarzo intersticial y feldespato potásico puro pero las rocas de grano más fino carecen de este. Los modos estimados son 10 a 15 de cuarzo, 45 a 60 de andesina, 5 a 15 de hornblenda, 5 a 20 de biotita y 0 a 10 de feldespato potásico. Los minerales accesorios típicos son: esfena, apatito, óxido de hierro y raramente allanita. Clorita y epidota son productos comunes de alteración. Se observaron trazas de augita en una sección delgada.

Esta roca, especialmente en su parte sur muestra una semejanza en textura y composición; con la granodiorita de los batolitos de Rionegro y Mogotes. Es más antigua que la cuarzomonzonita de La Corcova, pero quizás no mucho. Ciertamente es pre-Girón y posterior al principal metamorfismo regional, que se considera ordovícico.

5.2.3. Cuarzomonzonita del Batolito de Santa Bárbara (Jcgp)



Es una cuarzomonzonita biotítica, bastante uniforme inequigranular, de grano grueso que forma la masa principal del Batolito de Santa Bárbara y que toma el nombre del caserío de Santa Bárbara, que está cerca al centro de la masa (Figura 18).

La cuarzomonzonita del batolito de Santa Bárbara, se extiende desde cerca de Berlín, en la parte este-central de la Plancha 110, y hacia el sur hasta la Falla Bucaramanga cerca de la confluencia de los ríos Chicamocha y Guaca. El batolito tiene cerca de 60 Km de longitud y su ancho varía entre 5 y 12 Km. Su forma es lineal y sus bordes están fallados solamente en algunos sitios. Dos intrusiones pequeñas del granito de Pescadero, se encuentran en el extremo norte cerca a Berlín.

Las rocas dentro del batolito se presentan de una manera muy uniforme como cuarzomonzonita rosada de grano grueso. Aunque la cuarzomonzonita de Santa Bárbara está principalmente localizada en el batolito del mismo nombre, la cuarzomonzonita aflora en áreas pequeñas del río Angosturas, en el sur de la parte noreste del Cuadrángulo H-13 y en un área cerca de la Laguna de Ortices al sur de San Andrés, en el cuadrángulo I-13. La Cuarzomonzonita ha sido reconocida en algunos sitios dentro del batolito, al norte de Mogotes y cerca de San Joaquín.

La cuarzomonzonita de Santa Bárbara es macroscópicamente de grano grueso, algo inequigranular, rosado naranja a gris violáceo y contiene feldespatos potásicos rosado naranja a rojo grisáceo, plagioclasas blancas, cuarzo gris y 2 a 3% de biotita. En fases menos equigranulares, el feldespato potásico forma fenocristales hasta de 20 mm de tamaño. En fases más equigranulares el feldespato potásico alcanza hasta 15 mm de largo, las plagioclasas hasta 12 mm y el cuarzo hasta 5 mm. Los minerales máficos tienden a formar nidos pequeños en



algunas partes hasta de 5 mm de diámetro. El cuarzo, el feldespato potásico y las plagioclasas están presentes en cantidades casi iguales, pero generalmente el feldespato potásico es ligeramente más abundante que la plagioclasa.

Macroscópicamente, la cuarzomonzonita típica es inequigranular hipidiomórfica, oligoclasa y albita cálcica ligeramente zonada, subtabulares a equidimensionales. Los centros están usualmente saussuritizados, mientras que los bordes permanecen frescos. El feldespato potásico es microclina empolvada y pertita en forma de barras y cordones finos. La biotita es marrón verdosa y generalmente alterada a clorita y formando nidos con apatito, óxidos de hierro, zircón y allanita. Los productos de alteración son clorita y epidota. Se han reconocido también unos pocos granos de hornblenda en la cuarzomonzonita en el área de Berlín. Las cantidades relativas de los minerales accesorios son más o menos semejantes a las de la cuarzomonzonita de Mogotes, con excepción de un número mayor de muestras que contienen esfena.

En la fase más máfica, con colores más oscuros, la plagioclasa es tabular y bien zonada. La plagioclasa cálcica es oligoclasa y la hornblenda accesorio puede estar presente con biotita. La plagioclasa es más abundante que el feldespato potásico.

La cuarzomonzonita meteoriza produciendo fragmentos que forman un suelo poroso y en consecuencia, con nivel hidrostático bajo. Las pendientes del saprolito en un sitio cercano a Santa Bárbara, midieron 40°.

La roca está bien expuesta aunque muy meteorizada en la carretera de Los Curos a Guaca, que cruza el batolito a lo ancho. Accesibles afloramientos meteorizados se encuentran al suroeste de Berlín en la carretera de esta localidad a Baraya y Guaca.



Una fase de color más oscuro, de grano medio, con 5 a 10% de biotita y trazas de hornblenda aflora en algunos sitios. Esta roca está expuesta en la carretera Los Curos-Guaca, al este de la quebrada El Retiro y al oeste del río Umpalá. En algunos lugares se encuentran diques de aplita rosada en la cuarzomonzonita. Estos son más resistentes a la meteorización y forman resaltes lo cual puede verse en la carretera Los Curos-Guaca al oeste de la vuelta hacia Santa Bárbara.

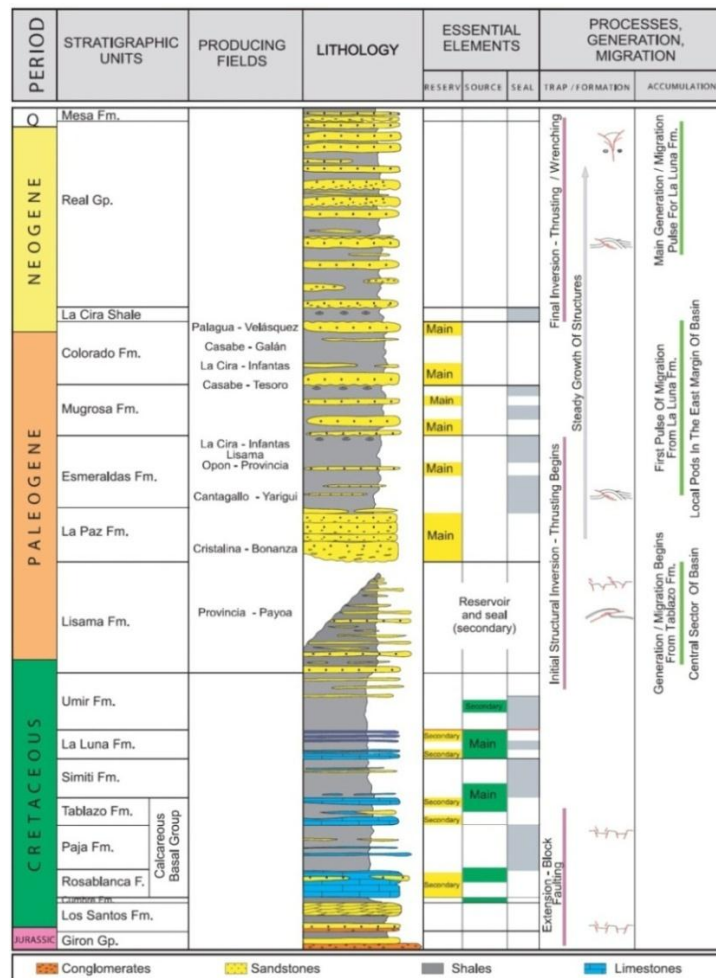
El conglomerado y la arkosa de la Formación Girón, del Jurásico, contienen detritos de la cuarzomonzonita de Santa Bárbara; el desmantelamiento y la erosión del batolito de Santa Bárbara deben haber tenido lugar antes del tiempo de la sedimentación del Girón. Dos datos radiométricos K/Ar en biotita de la cuarzomonzonita de Santa Bárbara dieron edades de 192 ± 7 y 194 ± 7 m.a. Estas edades están en armonía con una edad radiométrica obtenida de una fase biotítica (similar a la cuarzomonzonita del batolito de Mogotes) del granito de Pescadero situado al oeste. Además, una determinación K/Ar en una roca total de una muestra de filita tomada al sur de Berlín, 1 Km horizontal y probablemente menos de 1 Km vertical del contacto con el batolito dio una edad de 198 ± 7 m.a. Estas edades están aproximadamente en las cercanías del límite Triásico – Jurásico. Considerando las probables tasas de enfriamiento lento de un batolito de este tamaño (Winkler, 1969, p. 83; Hamilton, 1965, p. 71) es probable que la edad real del desplazamiento sea Triásico Superior, en vez de Jurásico Inferior, sin embargo, la designación de edad aquí adoptada es Jura-Triásico.



5.2.4. Unidades Sedimentarias de la cuenca del Valle Medio

La Cuenca del Valle Medio se localiza en las extensiones centrales del Valle del Río Magdalena entre las cordilleras Oriental y Central de los Andes Colombianos. El registro sedimentario muestra una sucesión de depósitos continentales Jurásicos cubiertos por los sedimentos Cretácicos, ambos calcáreos y siliciclásticos, son de ambientes de depositación de transicionales a marinos. La columna estratigráfica generalizada se indica en la figura 19.

Figura 19. Columna estratigráfica generalizada que ilustra las unidades de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, según la Agencia Nacional de hidrocarburos.



Fuente: Barrero, ANH, 2007.



5.2.5. Depósitos Aluviales, Coluviales y Glaciares Cuaternarios (Qal, Qtf, Qg)

Los Aluviones En las áreas montañosas, los depósitos aluviales son escasos y muy restringidos. Algunos de éstos cartografiados como aluviones en el páramo alto, posiblemente son en parte o enteramente correlativos, con los depósitos de terraza y de cono de y pertenecen posiblemente al pleistoceno.

Los Coluviones con áreas con gruesos depósitos de deslizamientos, talud, corrientes de lodo y de otros depósitos coluviales, se han agrupado en una sola unidad en los mapas geológicos regionales. Los depósitos de deslizamiento son las más comunes en las pendientes fuertes, particularmente donde la roca más resistente descansa sobre otra menos resistente. La edad de estos depósitos, como se sugiere probablemente va del Pleistoceno al Holoceno. El deslizamiento es un proceso activo en toda la región.

Los deslizamientos forman la parte más grande de esta unidad del mapa en la parte oriental de las Planchas 110 y 121. En 110-IV-C, W, un área de 4 a 5 Km² de arenisca de la Formación Aguardiente, se ha resquebrajado y deslizado buzamiento abajo hacia el sureste, en dirección del río Chitagá. En 121-III-B, los deslizamientos de una cuenca circular en las formaciones Aguardiente y Capacho, tienen salida a través de la angosta quebrada Agua Sucia, hacia el río Servitá. En 121-IV-A, SE, ocurrió un gran deslizamiento en las formaciones Barco, Colón y Mito Juan, el cual se movió hacia el noreste, dirección de la quebrada El Oso. En la superficie de estos deslizamientos puede verse, con base en las fotografías aéreas, rasgos que son semejantes a los que se ven en las superficies de glaciares, incluyendo fracturas y prominencias transversales a la dirección del movimiento.



Se encuentran Depósitos Glaciales de cantos de “till” en los flancos y pisos de algunos de los valles encima de los 3.200 m de altitud en las partes norte, central y suroriental del Cuadrángulo H-13. Estos depósitos son de forma típicamente lineal a media luna y ocurren como morrenas a lo largo de los valles o como morrenas laterales y terminales que los flanquean y atraviesan. En algunos sitios depósitos fluvioglaciales cubren los pisos de los valles. En muchos lugares, las morrenas, las morrenas terminales han sido parcial a totalmente removidas por las corrientes fluvioglaciales. Sin embargo, morrenas terminales bien formadas están preservadas en algunos sitios, como en la quebrada El Salado al norte de Vetas (Plancha 110-I-C, SE) y en la quebrada Ramírez al este de Cachirí (Plancha 110-I-A, N). Los depósitos morrénicos están bien desarrollados y fácilmente accesibles al norte de Berlín sobre la carretera a Vetas; otro extenso pero menos accesible se encuentra a unos 7 Km al norte de El Portillo (Plancha 121-I-B, NW). Un gran depósito de sedimentos de “till” está localizado al sur de Presidente y al norte del Páramo del Almorzadero (121-II-C).



5.3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Sedimentación predominantemente arenosa a pelítica y localmente calcárea durante el Proterozoico (945 ± 40 m.a.). Sedimentación granogradada cíclica: arenosa, pelítica, finoturbidítica, de ambiente de talud marino (?) acumulada durante el Cámbrico (?) y Metamorfizada durante el lapso de 450 -410 m.a. (?) hasta la facies de esquistos verdes, conjuntamente con emplazamiento (?) de neises graníticos y metadioritas. Sedimentación marina epicontinental durante el lapso Devónico-Pérmico. Desgarre (rifting) durante al Triásico – Jurásico y actividad volcánica félsica a intermedia. Sedimentación intracontinental durante el jurásico. Sedimentación marina epicontinental durante el Cretácico. Estudios paleomagnéticos sugieren un bloque autóctono desde el Triásico; los datos gravimétricos sugieren que se trata de un bloque cratónico levantado (Ward *et al.*, 1973).

La evolución geológica para la estribación noroeste de la cordillera oriental, se han determinado ocho eventos tectonoestratigráficos (Clavijo *et al.*, 2008). Estos eventos son de, más antiguo a más reciente:

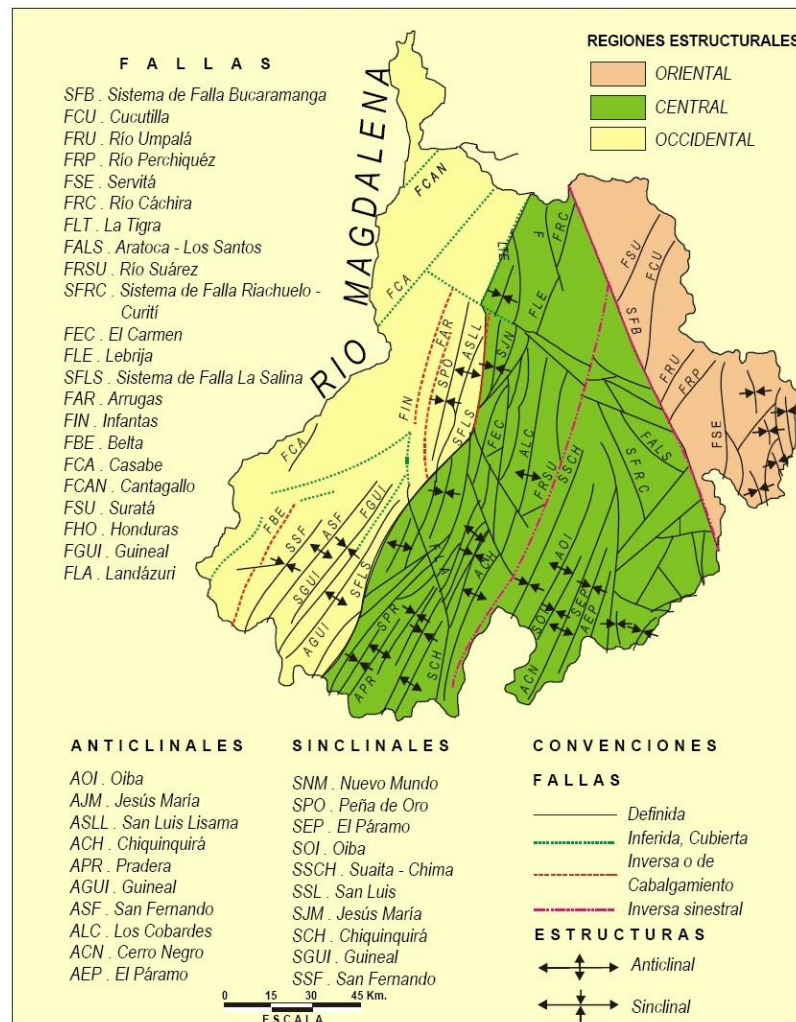
- 1) Evento Metamórfico Proterozoico.
- 2) Evento Metamórfico Paleozoico Temprano.
- 3) Evento Volcanosedimentario Triásico Tardío – Jurásico Medio.
- 4) Etapa Magmática Jurásica Media.
- 5) Evento Magmático Jurásico Tardío.
- 6) Evento Sedimentario Jurásico Tardío.
- 7) Evento Sedimentario Cretácico – Eoceno Temprano.
- 8) Etapa Magmática Albiana – Cretácica tardía.
- 9) Evento de Inversión tectónica Eoceno – Oligoceno.
- 10) Evento Mioceno – Reciente.



5.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

Royero y Clavijo (2001), definieron que estructuralmente en el macizo de Santander predomina un sistema de cabalgamientos en bloques, derumbo Norte-Sur a Noreste y un sectorde pliegues anticlinales y sinclinales estrechos, ubicados en el extremo más oriental del departamento (Figura 20). En esta región se destacan fallas geológicas como: Bucaramanga, Cucutilla, Suratá, Servitá y otras.

Figura 20. Esquema estructural regional del Departamento de Santander.

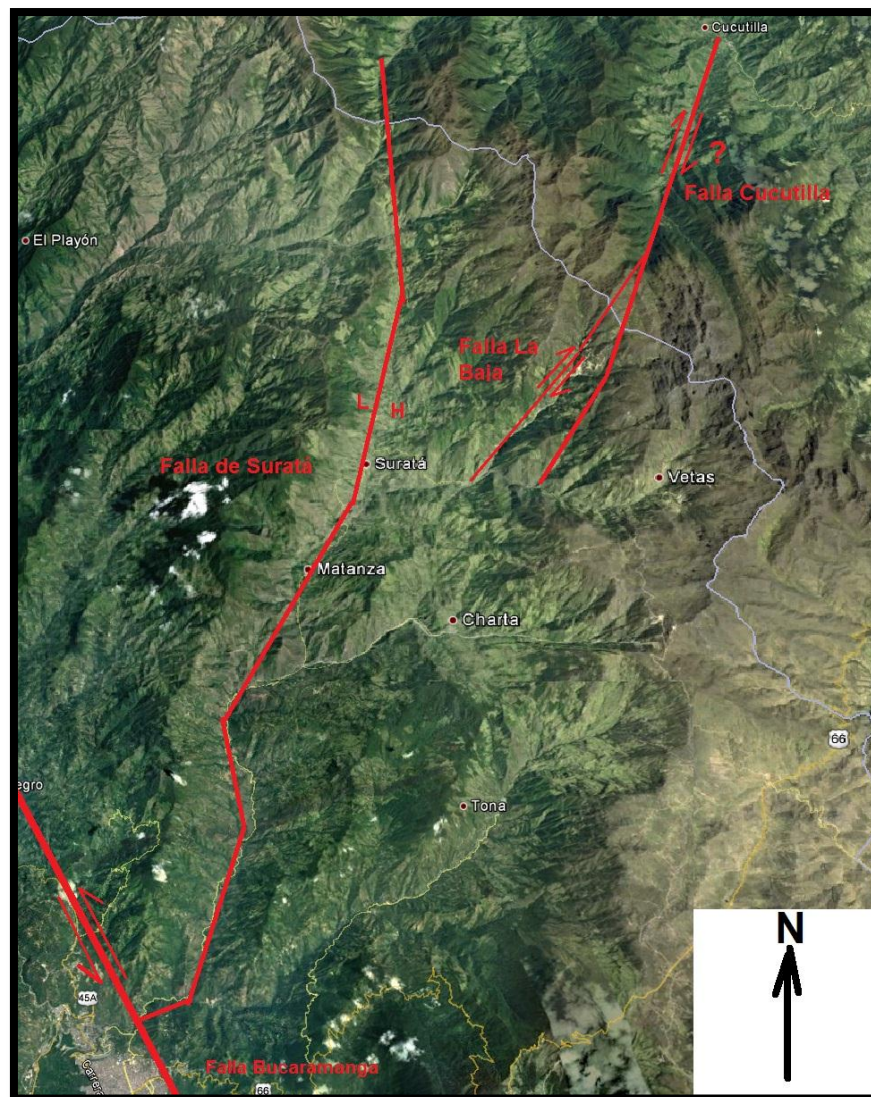


Fuente: Vargas, 1979; León, 1991; Clavijo, 1993.



De todas las fallas regionales reconocidas dentro del Departamento de Santander, las dos más relevantes para el presente estudio son: el Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta y la Falla Cucutilla esta última reconocida como una falla antitética del Sistema de Fallas de Bucaramanga. Estos rasgos estructurales mayores (figura 21) son de gran interés y se describirán a continuación.

Figura 21. Imagen satelital con la ubicación del análisis estructural que afecta el área del proyecto.



Fuente: Google Earth, 2012.



5.4.1. Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta

Es un sistema de fallas mayor que se extiende por una distancia de 550 Km desde la Costa Caribe hasta las estribaciones occidentales de la Cordillera Oriental en cercanías al paralelo N 6.5°, al sur de la ciudad de Bucaramanga. La falla es una de las principales fallas de rumbo (desgarre) del territorio colombiano con un componente sinistral principalmente (lateral izquierdo) de alrededor de 110 Km (Campbell, 1965). La falla Santa Marta forma los límites entre varios terrenos geológicos distintos: es el límite occidental del Macizo de Santa Marta y separa la cuenca del Valle Inferior de la cuenca Cesar y el Macizo de Santander de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Divide también la parte norte de la Cordillera Oriental en dos regiones estructurales distintas. La elevación del bloque está dada principalmente por la compresión de las rocas ígneas y metamórficas de edades paleozoicas a Proterozoicas, en menor proporción rocas Jurásicas y Cretácicas. En la mitad norte de la falla se encuentra parcialmente cubierta por depósitos del Cuaternario y Holoceno en los valles de los ríos Cesar y Magdalena.

Longitud: 374.1 Km (366.5 Km acumulado).

Rumbo Promedio: $-19.1^{\circ} \pm 23^{\circ}$ (N19.1°W \pm 23°).

5.4.2. Falla de Cucutilla

Esta forma un marcado lineamiento, muy notorio dentro del área entre Vetas y California: inmediatamente después se torna confusa y ramificada. El ramal principal posee una dirección suroeste cruzando el río Vetas y Páramo Rico, donde se intersecta con la Falla Charta. Un ramal de esta puede conectar con una probable falla a lo largo de la quebrada La Baja.



La mineralización en el área de la quebrada La Baja puede tener alguna relación con la Falla del río Cucutilla, si no directamente con la falla misma, sí con las fallas satélites oblicuas a dicha falla principal. El desplazamiento en la Falla de Cucutilla es indeterminado porque las rocas a ambos lados son similares y el desplazamiento no es evidente.

5.4.3. Direcciones y características mayores de las estructuras

- **Área de Berlín – Vetas – Páramo de San Turbán**

El rasgo más notorio en el área del Páramo de San Turbán está constituido por un domo incompleto en la zona del río Caraba. Este domo cabecea moderadamente hacia el sur cerca al río ya mencionado y suavemente hacia el norte, en las áreas de Morro Nevado y Vetas. La Formación Silgará buza apartándose del domo en el lado este y rodea al Neis de Bucaramanga y el Ortogneis, en el lado sur. En el mapa el patrón del Ortogneis y de la Formación Silgará al oeste de Mutiscua, sugiere la presencia de pliegues isoclinales, que cabecean suavemente, dentro de la estructura mayor. Estos pliegues deben estar replegados cerca del río Caraba. Más al oeste, hacia Vetas y California, los patrones son menos claros. Sus rumbos van hacia el norte y la foliación y la estratificación, por lo menos en la parte oeste, buzando hacia el oeste. Cerca de Morro Nevado algunos afloramientos muestran pliegues de arrastre inversos con planos axiales que buzando hacia el oeste, lo que indica inversión hacia el este. Varios grandes pliegues isoclinales pueden ser observados en los excelentes afloramientos del Neis de Bucaramanga en esta área. Sin embargo, la carencia de observaciones dentro del área no permite determinar el patrón complejo del plegamiento de esta faja. Al este de Cachirí la distribución de los tipos de roca en el Neis de Bucaramanga sugiere un homoclinal buzando hacia el oeste o una secuencia isoclinamente plegada.



5.4.4. Patrón estructural local para el Distrito Minero de Vetas y California

Sobre el patrón de fallas presentes en el DMVC, es importante resaltar que tanto en las imágenes aéreas, como en campo, se reconocen espacialmente las siguientes estructuras con trazos aproximadamente rectilíneos: NE (las mejores definidas en el terreno), MW (algo menos evidentes) y NNW (con menos evidencias en campo e imágenes aéreas). Estas estructuras han sido definidas como fallas, apoyados en rasgos geomorfológicos, presencias de brechas, etc. La ausencia de datos de campo en algunos tramos rectilíneos, se infiere la continuidad de estas fallas, básicamente apoyados en la interpretación de las imágenes aéreas.

Se pueden relacionar estos patrones generales de fallas identificadas en campo, para intentar sobre esta base plantear el posible control de estas estructuras haya podido jugar durante el emplazamiento de las rocas Miocénicas.

Con el sistema de fallas NE antes mencionado, vale la pena relacionar aquellas fallas que siguen de alguna manera el trazo de las quebradas La Baja, Móngora, La Plata y El Salado. La presencia de brechas (incluso con mineralización) a lo largo de la quebrada La Baja, es un rasgo que igualmente puede ser tomado como evidencia de este patrón de fallas. Las fallas de dirección NW, algo menos evidentes en el terreno y en las imágenes, suelen presentar brechas de fallas, con clastos mineralizados, con oquedades y sin cemento. Con este sistema de fallas, se relaciona a manera de ejemplo la falla que sigue el trazo de la quebrada Páez y continúa muy próxima a la entrada al proyecto Angostura. Asimismo, con este sistema de fallas se relacionarían aquella falla que sigue aproximadamente el trazo de la quebrada El Arado (afluente de la quebrada La Plata), pasa por la Loma Los Caneyes (cortando a esta), sigue por la ladera suroeste del Cerro Violetal, continúa hacia la quebrada Chorrerón y llega a la Falla La Baja, para



posiblemente continuar (?) hacia el NW. Las fallas de dirección NNW, son aquellas que siguen el mismo patrón de la Falla Bucaramanga (alguna falla de esta familia, parece quedar cubierta por las rocas sedimentarias del Cretácico, sin evidencia de reactivación). Entre estas estructuras, destaca la falla observada a lo largo de las quebradas La Botija (especialmente en su tramo cercano a su desembocadura al río Vetas, la cual se proyecta hacia el sector de la Mina La Tosca.

Respecto a la temporalidad de estos sistemas de fallas, parece coherente establecer que las fallas de dirección NNW son las estructuras más antiguas, las cuales han debido jugar una historia de deformación compleja, tales como cambios en el comportamiento y en la dirección de desplazamiento de los bloques, aspecto que fue documentado incluso desde los primeros estudios realizados en cercanía al Macizo de Santander por Juliver (1959). Estas estructuras, al parecer también debieron reactivarse durante el Mioceno, considerando que numerosos diques Andesíticos de esta edad tienen una disposición espacial 180/45 y suelen estar presentes en cercanías a las zonas de intersección de este sistema de fallas, con aquellas de dirección NE. Las fallas NW, las más jóvenes, se consideran como fallas inversas, asociadas a levantamientos del bloque norte y hundimiento del bloque sur. Este basculamiento para este sistema de fallas, permite sugerir de manera preliminar que el estilo de la mineralización del bloque norte (por ejemplo al norte de la quebrada La Páez), puede estar representando partes más profundas del paleosistema magmático-hidrotermal responsable de la mineralización de Au-Ag en el distrito, en comparación con lo representado al sur de esta falla, por ejemplo, como lo observado en El Cuatro o algo más al sur (Mendoza, 2011; Rueda, 2011).



6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente investigación, son producto de varias metodologías aplicadas para la generación de cinco modelos geométricos-geomecánicos para cada túnel, simulados en 3D con el software RecMin 4.86 y un modelo geotécnico de estabilidad, también uno para cada túnel, utilizando como herramientas los programas DIPS 5.103 y UNWEDGE 3.0 de la casa Rocscience.

Con el enorme y acelerado desarrollo de la informática en los últimos 25 años y con el continuo avance en todos las áreas del conocimiento, se ha logrado que los equipos informáticos aumenten sus capacidades y accesibilidad, y cada día es mayor el número de programas o herramientas informáticas utilizadas para el cálculo y modelación de excavaciones subterráneas, junto con la incorporación de nuevos modelos físicos y matemáticos.

Primero se realizó una corroboración por parte del investigador de las unidades litológicas y rasgos estructurales más importantes a nivel del macizo rocoso a modelar y sus proximidades, con la finalidad de tener un conocimiento adecuado del contexto geológico del área de estudio, el cual es fundamental para los posteriores análisis (figura 22). Esta primera parte se realizó durante el levantamiento de las líneas geotécnicas de líneas en superficie y subterráneas en galerías artesanales dentro del área del presente estudio, para la caracterización empírica por parte del investigador del macizo a modelar, aplicando la metodología de clasificación geomecánica del Q de Barton.

Paralelamente se procedió con la importación y el análisis preliminar de los datos en el software RecMin 4.86, donde se seleccionaron 183 perforaciones de las primeros 559 núcleos logueados suministrados por la empresa para la elaboración de los respectivos modelos. Se decidió que los datos a modelar fueran cuatro parámetros geomecánicos: recuperación, RQD y J_a ; junto con los valores de la



clasificación de Q de Barton, utilizando el método del Inverso de la distancia para la generación de modelos de bloques generales (10 x 10 x 10m) y modelos detallados de (2 x 2 x 2m), uno para cada túnel de acceso individual.

Toda la información recolectada en campo, se procesó en el software DIPS y en conjunto con el análisis de los modelos de bloques, se utilizó en la herramienta UNWEDGE el análisis de estabilidad de las cuñas y sostenimientos requeridos para los túneles por separado.

Finalmente en el capítulo siguiente de discusión de resultados, se determinó la veracidad y coherencia con la realidad de los modelos generados, utilizando perforaciones posteriores al modelo y las observaciones de campo.

6.1. GEOLOGÍA LOCAL

Los diferentes tipos de rocas presentes en área de la quebrada La Baja, pueden agruparse en tres conjuntos litológicos. El primero está constituido por rocas metamórficas de alto grado, complejamente deformadas y representan las rocas más antiguas para zona del presente estudio y la región. El segundo conjunto agrupa los cuerpos intrusivos, stocks y diques de roca silicificada (vetas y brechas tectónicas e hidrotermales mineralizadas). Conformando el tercer conjunto y distribuido de forma aleatoria por la zona se encuentran unidades de rango menor correspondientes a depósitos aluviales (terrazas), coluviales y glaciales.

En el área del presente estudio existen dos brechas mineralizadas claramente reconocidas en los núcleos de perforación y en las galerías artesanales: la primera es una brecha hidrotermal conocida con el nombre de La Mascota y la segunda es una brecha tectónica conocida con el nombre de El Gigante.

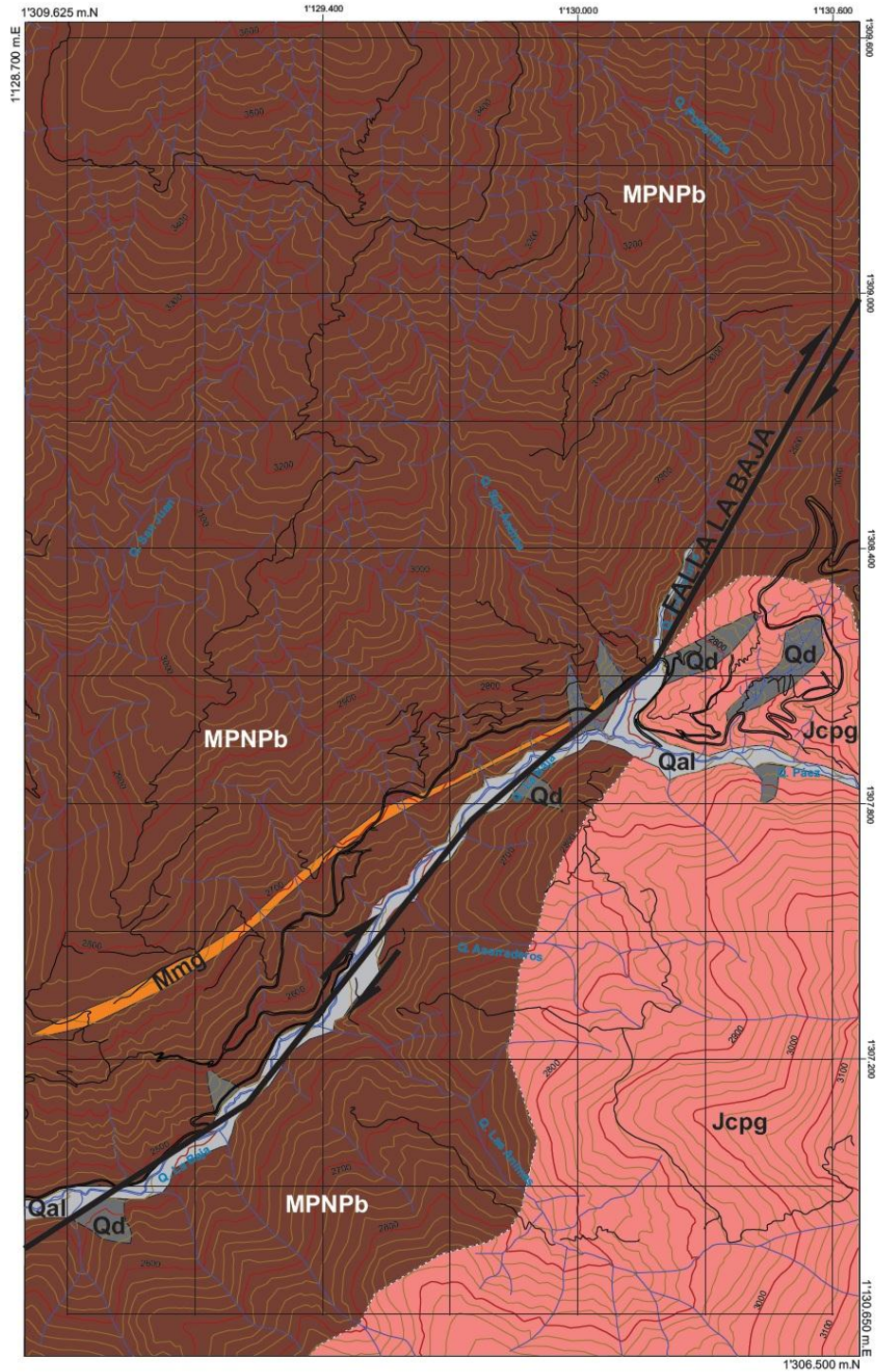


En asociación con las brechas mineralizadas se encuentran zonas de alteración hidrotermal en la roca caja (Neis de Bucaramanga), entre las alteraciones registradas en el área son principalmente: propilítica, argílica y la silicificación, y en menor proporción las alteraciones fílica y argílica avanzada. Estas zonas son de especial interés, ya que debido al proceso de alteración se producen cambios mineralógicos importantes de la roca caja, induciendo en algunos casos zonas geomecánicamente singulares.

Dentro de las observaciones locales cabe también mencionar que para la ladera NW del cañón de la quebrada La Baja, que será el lugar de emboquille de los tres primeros túneles (accesos) exploratorios de la empresa AUX Colombia SAS, y allí se presenta una gruesa capa de suelo residual, lo cual representa la primera zona singular de interés para el establecimiento de emboquilles.

Para el área de influencia del macizo rocoso planteada en el mapa geológico regional (fig. 21), se considera que los lineamientos fotogeológicos que podrían ser posiblemente un sistema de fallas locales en dirección NE (siguiendo aproximadamente la dirección de la quebrada La Baja), es decir, en dirección similar a la Falla Cucutilla; pero las observaciones en los diversos afloramientos no se encontraron suficientes evidencias que apoyen la teoría de que los lineamientos sean claramente catalogados como fallas definidas. Mientras las observaciones de las galerías evidenciaron algunas zonas de cizalla locales, con presencia de: harina de falla, zona de trituración adyacente y estrías de fallas, con evidencia de cinemática dextral.

Figura 22. Mapa geológico en escala 1:10.000 del área de influencia del macizo rocoso de interés.



Fuente: Basado en Mendoza & Jaramillo, 1979.

6.1.1. Litoestratigrafía



En el área cartografiada se corroboraron las litologías presentadas en el mapa geológico del área de California (Mendoza & Jaramillo, 1975), se prestó importante atención a la definición de contactos litológicos y rasgos estructurales mayores. Se encontró cinco unidades litológicas diferentes: Neis de Bucaramanga, Cuarzomonzonita del Batolito de Santa Bárbara, Unidad La Mascota, Unidad El Gigante y Depósitos sedimentarios recientes.

- **Neis de Bucaramanga (MP-NPb)**

La distribución de los principales afloramientos de la unidad donde la roca se encuentra relativamente fresca se limita a las áreas de las quebradas del área de interés, especialmente a lo largo de las quebradas Angosturas, Páez, San Andrés, Aserradero y La Baja, entre otros drenajes menores. La presencia de numerosas apófisis de rocas ígneas (alteradas o no, hidrotermalmente) y alteraciones que afectan al Neis de Bucaramanga dificultan la delimitación y cartografía precisa.

Basados en los datos de campo y logging geológico, se define que localmente la unidad del Neis de Bucaramanga es la unidad más importante en extensión y es la roca caja de las mineralizaciones del proyecto. Corresponde a rocas néisicas de composiciones variables entre neises augen biotíticos (BA, figura 23-3), neises hornbléndicos (BG, figura 23-4), neises biotítico anfibólicos (BG, figura 23-2), neises cuarzo-feldespáticos (GAP, figura 23-5), neis de cuarzo plagioclasa (GAP, figura 23-6) y algunos niveles de anfibolitas de tamaño de cristal de fino a medio (A. figura 23-1). Las texturas predominantes son granoblásticas y granonematoblásticas, con la estructuras augen en algunos casos.

La estructura néisica está definida por la orientación subparalela de los cristales máficos y biotita. La variedad predominante es el neis hornbléndico biotítico



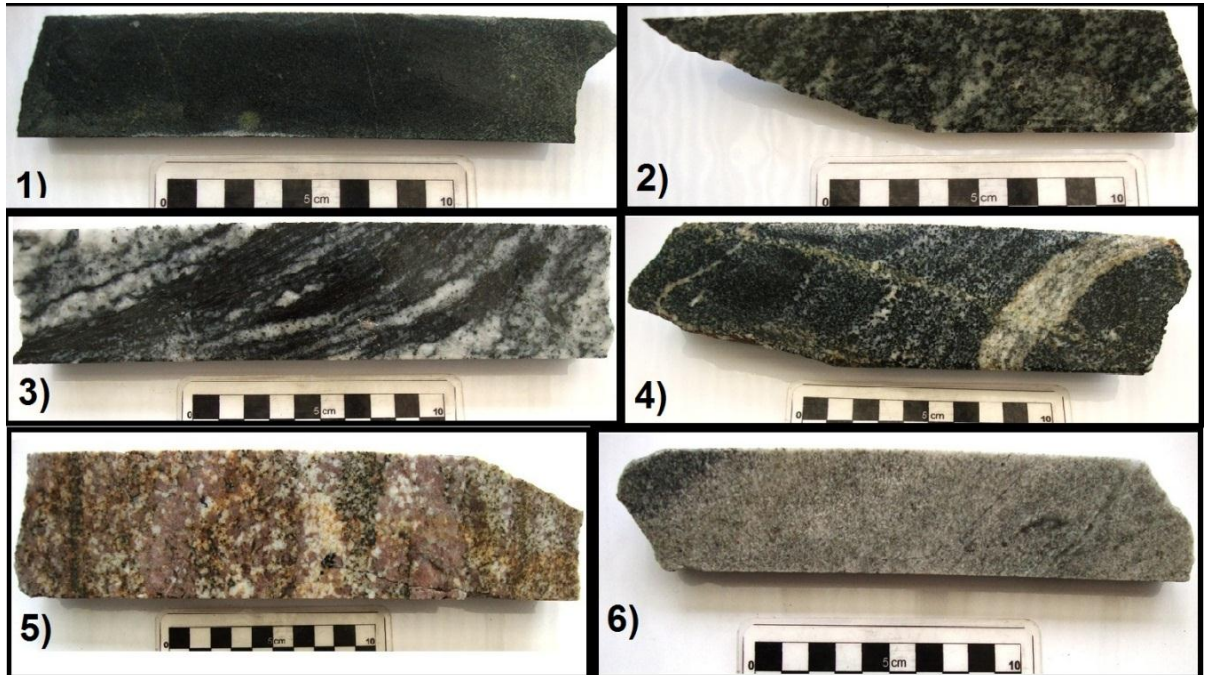
constituido por plagioclasa (40-50%), hornblenda (10-30%), biotita (5-15%) y cuarzo (10-20%), intercalado con bandas leucocráticas de composición cuarzo-feldespática con máficos diseminados. Existen también algunas masas pequeñas de orto-neises con Muscovita y feldespato potásico. Algunos pequeños cuerpos de aspecto masivo a ligeramente néisico de color verde con alteración propilítica y esméctica, que corresponden a anfibolitas de grano medio. También se identificaron cuerpos de migmatitas sobre el cauce de la quebrada La Baja.

El neis de Bucaramanga presenta variedades pelíticas en las zonas superiores (por encima de la cota de la vía), mientras en las zonas inferiores se encontraron las variedades máficas y migmatíticas. En las rocas pelíticas se encontraron cristales de sillimanita formando la paragénesis: Sil, Qtz, Plg, Bt, Ms, Ox. Indicando un metamorfismo de alto grado en facie anfibolita y subfacie Sillimanita-Almandino-Ortoclasa.

Se elaboraron tres secciones delgadas para realizar el análisis mineralógico detallado de la matriz rocosa de la roca caja y poder identificar los cambios generados por la alteración hidrotermal. Dos de las muestras fueron recolectadas sobre el cauce de la quebrada San Andrés (W31 y W32) y la tercera se recogió cerca del emboquille del túnel La Minita (W33). Las muestras fueron llevadas a los laboratorios de la Universidad de Pamplona para la elaboración de las secciones delgadas y fueron analizadas en el laboratorio de petrografía de luz transmitida de la Universidad Industrial de Santander (fotografía 3).



Figura 23. Catálogo de variaciones litológicas de la unidad del Neis de Bucaramanga (catalogo descripción de testigos, AUX Colombia).



Fotografía 3. Testigo, Sección delgada (W32) y trabajo de laboratorio.

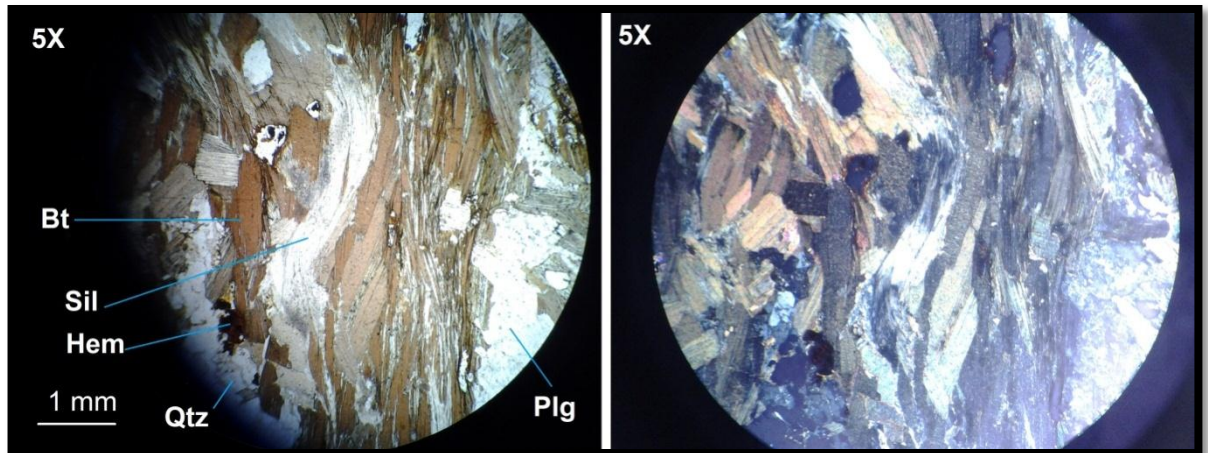


La muestra de la fotografía 3, estructura néisica está definida por la orientación subparalela de los cristales de feldespato potásico, plagioclasa alterada y cuarzo. Esta muestra es de un neis cuarzo feldespático con alteración argílica baja, esta muestra está constituido por ortoclasa (35%), plagioclasa alterada totalmente a illita y sericita (25%), cuarzo (25%), muscovita (10%), hematita (2%), esfena (2%) y zircón (1%).



En la fotografía 4, se muestra bajo el lente del microscopio de luz transmitida una banda micácea de la muestra de neis pelítico inalterado de la muestra W31, la estructura néisica está definida por bandas micáceas compuestas principalmente por biotitas intercaladas con bandas de cuarzo – plagioclasa. La muestra W31 está constituida por cuarzo (40%), plagioclasa (30%), biotita (25%), Muscovita (2%), sillimanita (2%) y óxidos de hierro (1%).

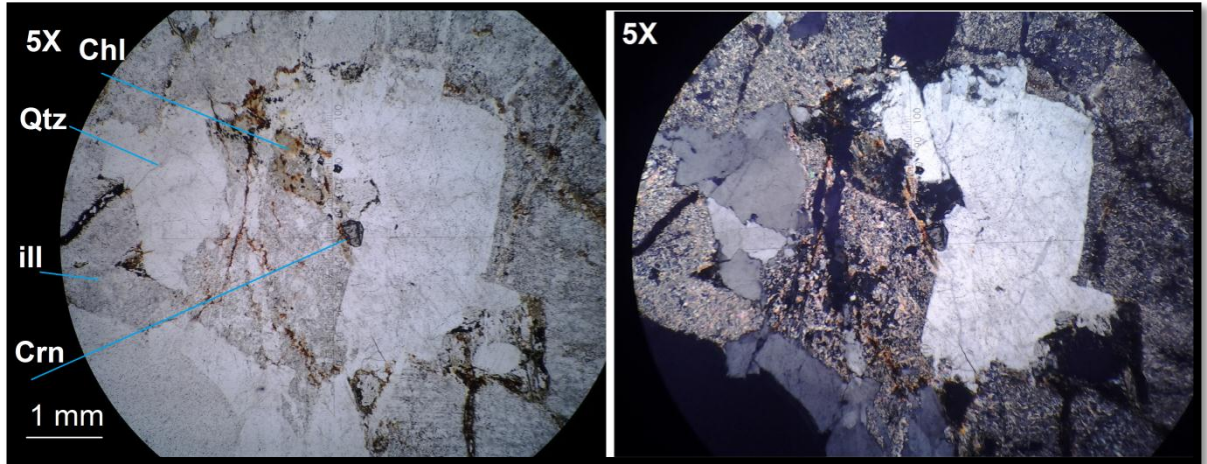
Fotografía 4. Muestra W31, vista bajo el microscopio de luz transmitida con objetivo 5x en nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda).



En la fotografía 5, se indican los minerales y observaciones especiales realizada en la muestra W33, esta muestra es un neis pelítico de plagioclasa – cuarzo con alteración argílica media sin bandeamiento néisico marcado. Constituido por illita (55%, formada de alteración de plagioclasas), cuarzo (25%), clorita (15%, formada de alteración de biotita), muscovita (4%) y corindón (1%).



Fotografía 5. Muestra W33, vista bajo el microscopio de luz transmitida con objetivo 5x en nicoles paralelos (derecha) y nicoles cruzados (izquierda).



- **Cuarzomonzonita**

Esta unidad conforma la expresión geomorfológica conocida con el nombre de cuchilla El Violetal.

Esta litología a nivel regional es conocida como el Batolito de Santa Bárbara, litológicamente corresponde cuarzodioritas a cuarzomonzonitas masivas a ligeramente néisicas. Con textura holocristalina de tamaño de cristales medio a grueso, color blanco moteado (fotografía 8). Mineralogía: Plagioclasa 60%, Cuarzo 10%, Feldespato potásico 10%, hornblenda 12% y Biotita 8%. Los afloramientos encontrados de esta unidad se encuentran en ladera norte de la cuchilla El Violetal, son rocas con alteración hidrotermal y silicificación, generalmente de color blanco con zonas rojizas, cuarzo bipirámide y resistencia R5 a R6 en casi todos los afloramientos (fotografía 6).



La mineralización para esta unidad es conocida como Aserraderos, según la figura 25, corresponden con venas de falla ricas en sílice. La alteración hidrotermal predominante es de tipo filica, en sus diferentes grados (baja, media o alta).

Fotografía 6. Muestra de la Cuarzomonzonita de la cuchilla El Violetal..



- **Unidad La Mascota**

Este nombre fue sugerido por Jeffrey Hedenquist en julio de 2010 y comprende una zona de brecha hidrotermal clasto-soportada con fragmentos subangulares cementados en sílice gris, comúnmente con textura botroidal. Esta zona contiene algunas brechas tectónicas mineralizadas, pero la mineralización principal corresponde a brechas hidrotermales monomícticas y polimícticas con clastos que van desde subangulares hasta subredondeados (fotografía 7), cementados por una matriz de sílice gris acompañada de sulfuros como pirita, calcopirita, bornita, enargita, digenita, covelita, calcosita y esfalerita. Gran parte de estos sulfuros están dispuestos en vetillas, bordeando clastos, agregados, masivos y



diseminados en la sílice gris (fotografía 7). Esta unidad registra los mayores contenidos de oro del proyecto. Es importante indicar que en algunos sectores de La bodega se presentan algunas brechas hidrotermales localmente matriz soportada, contexturas similares a las de la unidad La Mascota. Está brecha se asocia con la alteración argílica del Neis de Bucaramanga.

Fotografía 7. Núcleo de perforación que muestra la unidad La Mascota. Brecha hidrotermal polimíctica con clastos subangulares cementados por una matriz de sílice gris y pirita fina en agregados (catálogo de descripción de testigos, AUX Colombia).





- **Unidad El Gigante**

Estructura mineralizada caracterizada por ser una brecha tectónica matriz soportada, con foliación tectónica y texturas cataclásticas (fotografía 10), con algunos segmentos cortos de brecha hidrotermal y con un contenido medio a alto de sulfuros, predominando la pirita de tamaño fino a medio presente en vetas, vetillas, masiva y en parches. Ocasionalmente pueden observarse sulfuros de cobre como calcopirita, bornita y calcosina, cuarzo calcedónico, que en ocasiones puede estar asociado a microvenas y texturas coloformes con pirita y alunita; todo esto intercalado con grandes segmentos de neis silicificado con baja a moderado contenido de sulfuros, principalmente pirita y cuarzo en venas y pirita diseminada. Localmente lo cortan pequeñas fallas caracterizadas por pequeñas franjas de material molido con arcilla y fragmentos subredondeados de cuarzo y gneis. La unidad E l Gigante sigue un corredor estructural subparalelo a la Unidad La Mascota, con una dirección de buzamiento promedio de 330° y una magnitud de buzamiento de 73° .

Fotografía 8. Núcleo de perforación que muestra la unidad El Gigante. Brecha tectónica matriz soportada, con foliación tectónica y estructuras cataclásticas (catálogo de descripción de testigos, AUX Colombia).



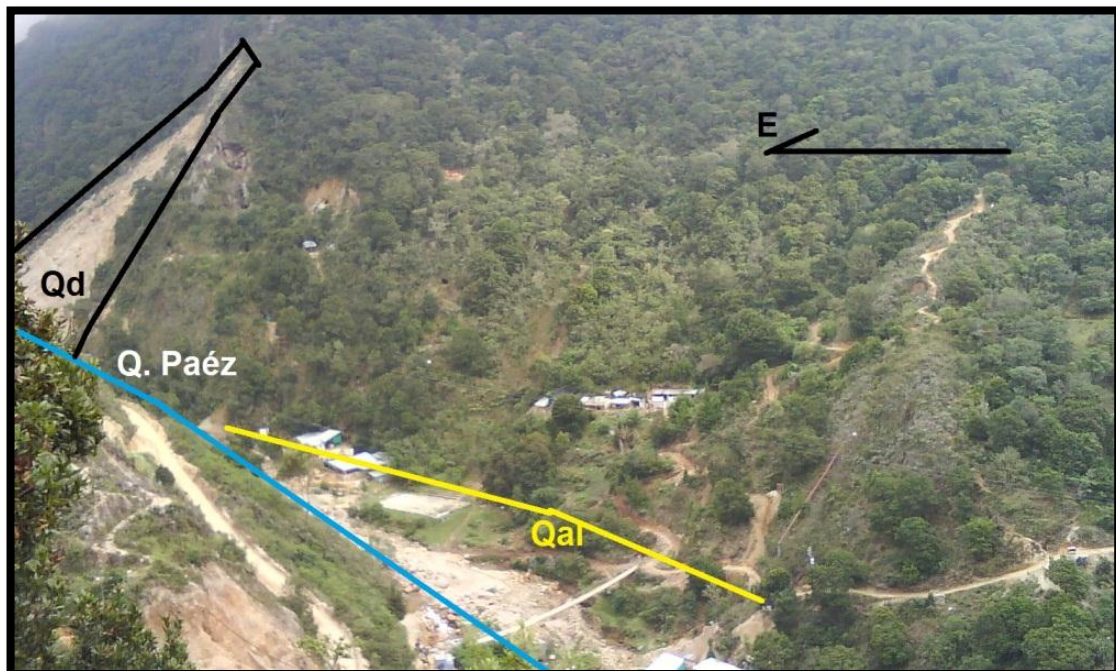


- **Depósitos Sedimentarios Cuaternarios (Qd, Qal)**

Los depósitos formados por la sedimentación de materiales rocosos erosionados, poseen diversos orígenes. Los más antiguos se encuentran los depósitos de origen glacial, que hoy sus remanentes son muy escasos. Las subunidad Qd, la cual corresponde con depósitos coluviales, principalmente deslizamientos y flujos.

La subunidad Qal, corresponde a depósitos aluviales y terrazas, que se presentan en los valles de las quebradas del área, compuestos por materiales polimícticos de granulometrías muy variables desde cantos hasta arcillas, los primeros con una importancia en área mayor (fotografía 9).

Fotografía 9. Panorámica donde se identifican las unidades cuaternarias en el área de confluencia de la quebrada Páez a la quebrada La Baja (sector el 20).





6.2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Tomando como punto de partida lo descrito en el apartado de geología regional, donde se introdujeron los rasgos estructurales mayores, se describen ahora las observaciones estructurales locales.

El análisis microestructural se llevó a cabo mediante el análisis de ortofotos y modelos digitales de elevación, sumado con el levantamiento de planos de falla con estrías y diaclasas, en las rocas de caja y mena, utilizándose indicadores cinemáticos como: estructuras tipo riedel, superficies estriadas y escalones de falla. Para el procesamiento de los datos, se utilizó el programa Dips.

En las galerías artesanales visitadas (TG-1, TG-2, H1, H2, H3 y La Minita) que atraviesan los cuerpos mineralizados de La Mascota y El Gigante, se exponen trazos de la Falla La Baja antes mencionada, evidenciando un movimiento dextral con un pequeño componente normal, con campo de esfuerzos concordante con el modelo de Riedel (fotografía 10 y figura 24), dando lugar a una expresión favorable para hospedar la mineralización en vetas en echelón (“dilatationaljog”), con una serie de brechas, vetas de cuarzo y de sulfuros subparalelas, además de “Oreshoot” o zonas de bonanza, a manera de bolsones, con valores más altos y concentrados en franjas de mayor permeabilidad por donde hubo mayor flujo, los cuales actuaron en varias etapas de mineralización.

Los datos estructurales tomados en planos de falla (Tabla 17) dieron una dirección de buzamiento promedio de 328° y una magnitud de buzamiento promedio de 72° , con un Pitch aproximado de 25° . Las cinemáticas definidas, se obtuvieron basados en estructuras riedel y escalones de falla, dando como resultado una cinemática dextral con un leve componente normal.



Se determina con el par cizalla sintética-antitética que las direcciones de los esfuerzos que producen la cizalla simple son:

- El esfuerzo compresivo máximo σ_1 en dirección aproximada W-E.
- El esfuerzo menor σ_3 en dirección aproximada N-S.
- Y por ende el esfuerzo σ_2 en dirección aproximadamente vertical al plano horizontal.

Los depósitos de La Mascota y El Gigante concentraron depósitos metalíferos, se extienden hasta el sector de la Bodega y siguen de manera paralela una zona de cizalla en el basamento a lo largo de un sistema de fallas de rumbo con dirección N40-60°E. Estas fallas constituyeron el control estructural para las mineralizaciones miocénicas y posiblemente fueron controladas por una intrusión asociada a un pórfido al suroeste del área del estudio, que durante su enfriamiento y cristalización, generó los fluidos necesarios, convirtiéndose en la fuente de la mineralización. La dirección en que dichos cuerpos se emplazaron, aprovecharon el fracturamiento inicial, puede estar representada por un modelo de cizalla tipo Riedel o cizalla simple (figura 24), es decir, se produjo deformación rotacional y no coaxial. Recordar que Riedel desarrolló sus modelos mediante experimentos de reconstrucción de la deformación esperable en tales condiciones con dos tablas (zócalo frágil), que se hacen deslizar una respecto de la otra, sobre las cuales se coloca una torta de arcilla (cobertura de comportamiento dúctil) de unos pocos centímetros de espesor, pero este modelo cinemático ha sido bastante aceptado y utilizado en estudios en rocas duras y a escalas regionales.

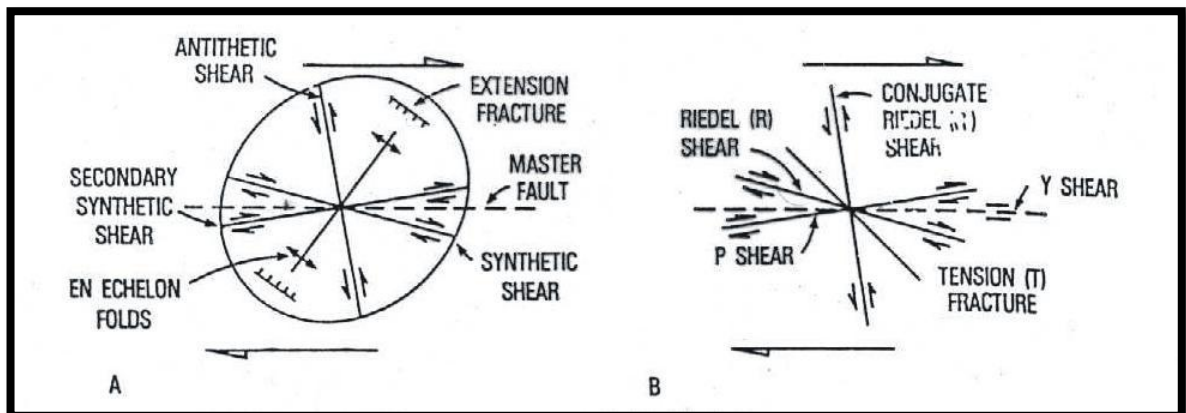
El macizo rocoso objeto de la presente investigación (MR), es el resultado final de la superposición de varios eventos y estados de esfuerzos regionales, a través del tiempo geológico; de esta manera se indica que esfuerzos principales definidos anteriormente son el resultado de la sumatoria de todos los eventos. En la fotografía 10 se muestra una zona falla en el frente de la galería artesanal H1.



Tabla 17. Tabla de los datos de fallas y sus cinemáticas, tomados en el trabajo de líneas geotécnicas subterráneas.

Galería	Plano de Falla		PITCH	Plano Diedro		Cinemática
	DIP	DDIP		DIP	DDIP	
La Minita	86	0	80	10	176	Normal
H1	67	194	42	48	164	Dextral-N
H1	79	350	15	76	280	***
H1	70	320	26	65	240	Dextral-N
H2	77	325	41	50	230	***
H2	85	330	33	60	27	Sinextral
H2	66	310	32	67	205	Dextral-N
H2	64	342	68	35	246	Dextral-N
H3 Falla	64	320	40	50	239	Dextral-N
H3 Riedel	66	305	10	80	205	Dextral-N
H3	85	340	***	***	***	***
H3	60	350	52	40	258	Dextral-N
H Δ1	60	328	50	40	44	***
TG1	86	340	22	70	237	Dextral-N
TG1 Falla	55	310	69	19	122	***
TG1 Riedel	84	307	***	***	***	***
TG2 Falla	82	341	32	71	195	Dextral-N
TG2 Riedel	74	130	***	***	***	***
Dextral-N	Falla con movimiento relativo derecho y componente normal					
***	Dato no medido					

Figura 24. Relaciones angulares en el ordenamiento de elementos estructurales asociados a cizalla simple.



Fuente: Sylvester 1984.



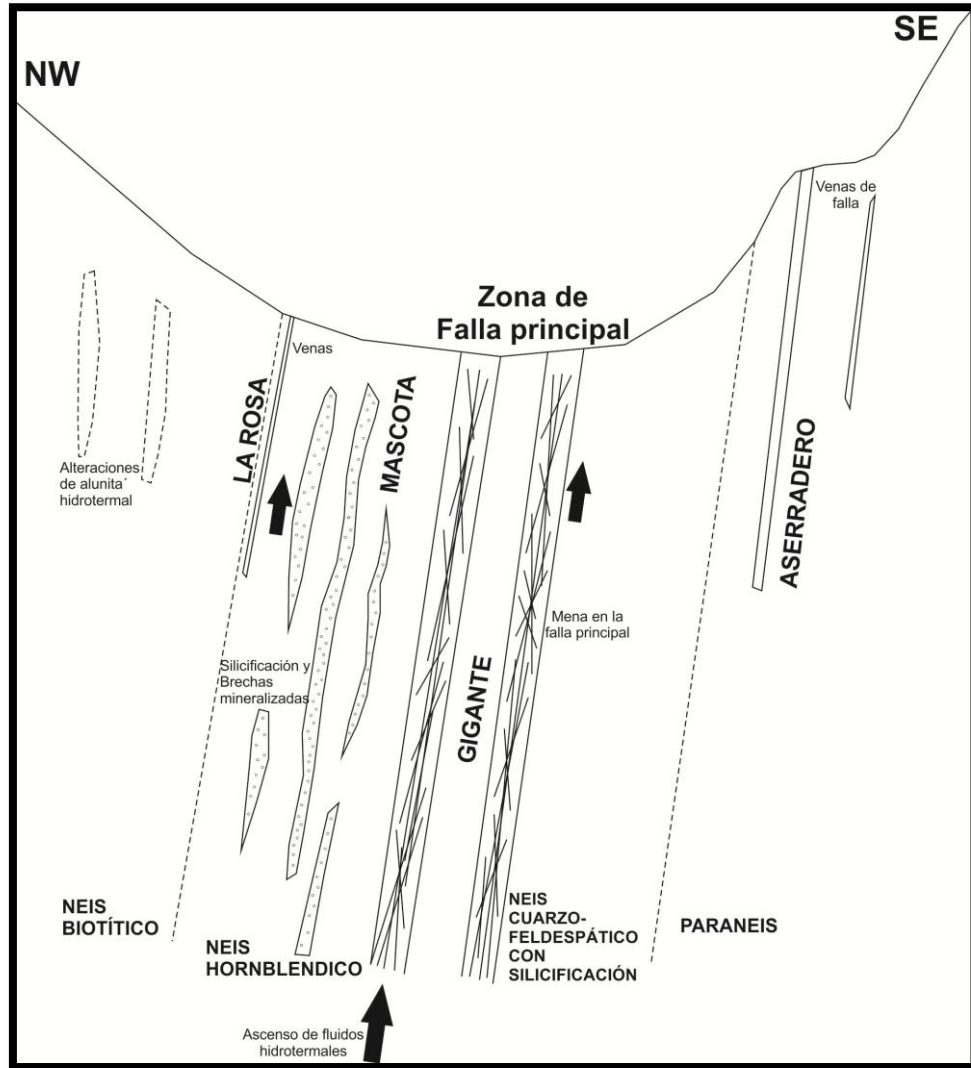
Fotografía 10. Zona de cizalla simple asociada a la cinemática de la Falla La Baja, fotografía de perfil del frente de la galería H1.



Resultado del análisis de las más de 900 perforaciones realizadas por la empresa AUX, el grupo de geólogos encargados del modelado del yacimiento han definido el modelo geológico conceptual (litologías y estructuras) en vista de perfil de la figura 25, ubicando la zona de falla en el centro y dividiendo al Neis de Bucaramanga en dos zonas litológicamente diferentes, al noroeste de la falla los neises son de composición hornbléndica principalmente, siendo de esta manera la roca caja de la brecha hidrotermal de La Mascota y en el sureste los neises son de composiciones más cuarzo-feldespáticas con silicificación que son la roca hospedadora de la brecha tectónica de El Gigante.



Figura 25. Perfil esquemático del nuevo modelo conceptual del comportamiento reológico versus estructuras mineralizadas.



Fuente: AUX Colombia sas, 2012.

Las diaclasas se definieron como de origen tectónico, es decir, diaclasas que se originan como resultado directo del empuje en las rocas. En el análisis de diaclasas se midió la dirección del buzamiento y la magnitud del buzamiento (total de datos 2534). Por lo anterior para en análisis estructural en Dips, se dividió el macizo rocoso de estudio (MR), en dos zonas o bloques, llamados bloque T1 y



bloques T3, separados por el drenaje denominado recientemente Colorados (Bloques cabalgantes, según datos Regional, AUX Colombia SAS).

Según las mediciones realizadas en el macizo rocoso en los sectores de La Rosa y El Gigante, se obtuvo que las discontinuidades se agrupan principalmente en tres familias o sets principales con la adición en algunas zonas de discontinuidades aleatorias o incluso una familia adicional, dadas por dos tendencias bien marcadas en parte inferior de la falsilla con acumulaciones de polos importantes.

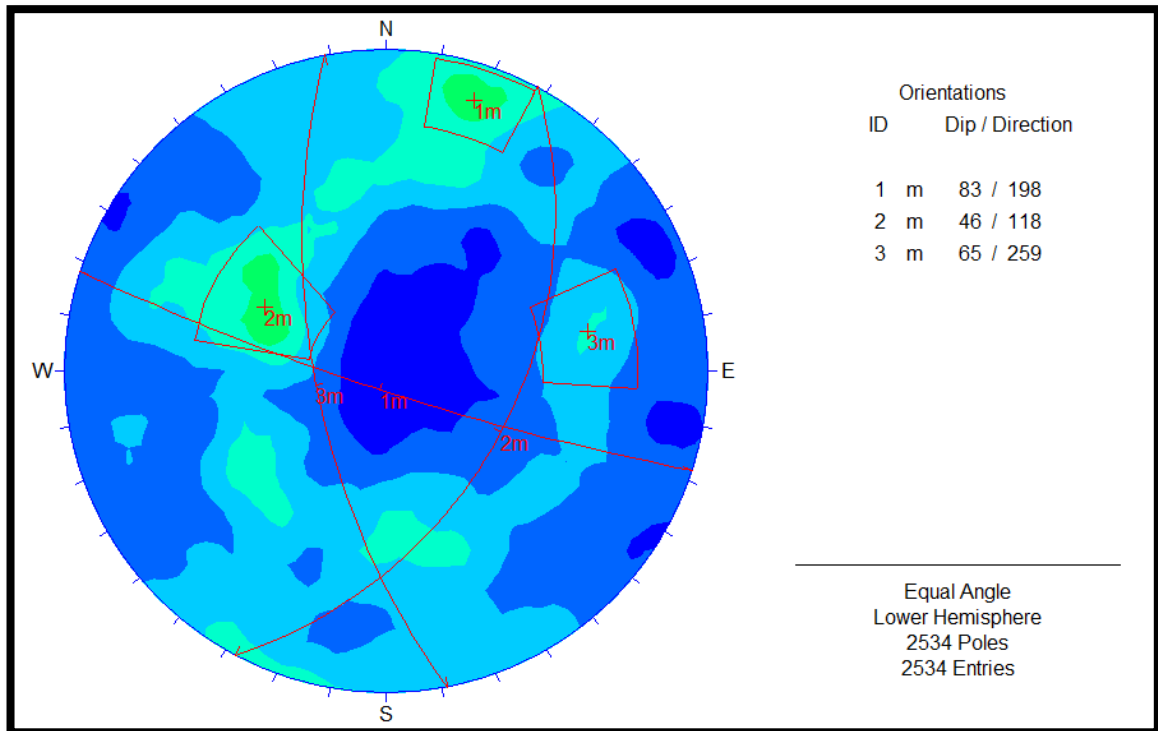
Los valores promedios, obtenidos del procesamiento estadístico de los 2534 datos tomados en campo, se representaron, con la ayuda del software Dips de la casa Rocscience. Con los resultados gráficos el estereograma de la figura 26, se definieron tres sets de discontinuidades locales a partir de las mayores densidades de polos observadas en el estereograma:

- 1) 198 / 83
- 2) 118 / 46
- 3) 259 / 65

Se interpretó que las familias 1 y 2 están ligadas a la Falla La Baja, ya que tenemos el set 2 de diaclasas predominantemente subparalelo a dicha falla pero con dirección buzamiento opuesto aunque con magnitud similar (magnitud alta) y el set 1 de diaclasas es prácticamente perpendicular al set anterior y por ende a la falla. Mientras la familia 3 parece estar más relacionada con la foliación metamórfica de la roca caja, ya esta familia de discontinuidades poseen orientaciones similares en dirección y magnitud de buzamiento, con las medidas de la foliación metamórfica tomadas en campo, puede esta última familia variar desde 260 hasta casi 360.



Figura 26.Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), para el macizo rocoso (MR) que contendrá los túneles de la empresa AUX Colombia SAS, a partir de los 2534 datos tomados en campo.





6.3. LÍNEAS GEOTÉCNICAS ES SUPERFICIE

Para cumplir con los objetivos planteados, el levantamiento de líneas geotécnicas en superficie es de vital importancia para conocer el comportamiento geomecánico de los tramos donde aflora el macizo a modelar, ya que en superficie el comportamiento generalmente es el caso de menor calidad para un macizo rocoso. Consecuentemente se realizó una búsqueda exhaustiva por toda el área de interés “MR”, de afloramientos relevantes en tamaño para realizar una caracterización geomecánica (línea geotécnica), es decir, como mínimo de un tamaño de 3 x 2 m (6 m²).

En la tabla 18, se colocan las 25 estaciones o deltas en las que se lograron identificar y caracterizar en 25 afloramientos, en los cuales se levantaron las líneas de la D1 a la D25. En la tabla se colocan los datos en coordenadas planas para la ubicación espacial del afloramiento caracterizado, junto con el número de datos estructurales y valor de clasificación geomecánica de Q de Barton.

Con todos los datos tomados en superficie se concluye que la menor calidad del macizo rocoso definida es de 0.04375 de índice Q, encontrada en la estación D5. Mientras la mejor calidad definida es de 1.9 de índice Q, encontrada en el delta D20.



Tabla 18. Localización, número de estructuras medidas y valores de índice Q de Barton, para las 25 líneas geotécnicas levantadas en campo.

Código línea geotécnica	Coordenada X	Coordenada Y	Número de Estructuras	Valor Q
D1	1'307.595	1'129.340	50	1,11
D2	1'307,591	1'129.341	80	0,25
D3	1'307.628	1'129.421	52	0,6
D4	1'307.945	1'129.989	80	0,1925
D5	1'307.969	1'130.047	80	0,04375
D6	1'307.863	1'129.671	45	0,775
D7	1'308.250	1'129.924	80	0,1833
D8	1'308.172	1'130.009	80	0,1
D9	1'308.182	1'130.027	80	1
D10	1'308.165	1'130.098	80	0,2955
D11	1'308.179	1'130.046	80	0,20499
D12	1'308.168	1'130.051	100	2,696
D13	1'308.088	1'130.010	60	0,966
D14	1'307.807	1'129.756	80	1,23816
D15	1'307.834	1'129.806	89	2,963
D16	1'307.881	1'129.854	107	1,2855
D17	1'307.930	1'129.747	80	0,46
D18	1'307.975	1'129.910	92	1,165
D19	1'307.929	1'129.879	81	0,22228
D20	1'307.903	1'129.872	82	1,90075
D21	1'307.840	1'129.839	85	0,578
D22	1'307.891	1'129.812	80	3,1386
D23	1'308.100	1'130.089	105	0,37483
D24	1'308.020	1'130.035	80	0,36988
D25	1'307.901	1'129.710	94	0,31167

Para la toma de los datos de los 25 afloramientos analizados, se utilizó el formato de la figura 9 y 27 (D4 y D11), este formato se basa en los formatos publicados por la ISRM para el método de clasificación Q de Barton, en diferentes años y publicaciones, y modificado por los geólogos de túnel de la empresa AUX Colombia SAS. En total se tomaron 2083 datos estructurales en 25 afloramientos, es decir, en un promedio 83 datos estructurales por estación.



Figura 27. Formato para la toma de datos en campo según la metodología del Q de Barton, formato de la línea geotécnica D11 (AUX Colombia sas., 2012).

REGISTRO GEOTÉCNICO MODELACIÓN TÚNEL 1 y 3											
Fecha:	03/11/2012	CORD. X:	1'308.179	CROD. Y:	1'130.046	Altitud:	2.794				
Hora:	10:00	Hoja No.:	11	PK Actual:	X	Avance [m]:	X				
Tomado por:	Wilfredy Morales	Revisión por:	X	PK Anterior:	X	Azimut:	X				
LITOLOGÍA Y ALTERACIÓN		Calidad del Macizo Rocoso (Clasificación Q de Barton)									
Litología:	Alaskita	CLASIFICACIÓN	Valor	Descripción							
Dureza:	Máx R4	RQD	66.26	Calidad del Macizo Rocoso es Media							
Código muestra:	TW-011	Jn	12	3 familias o sets de discontinuidades + aleatorias							
Tipo de muestreo:	Litológico	Jr	2.25	Diaclasas onduladas, rugosas a irregulares							
Alteración:	Argílica W	Ja	8	Sobreconsolidación de rellenos arcillosos, media a baja, con reblandecimiento (continuos menores a 5 mm)							
Mineralogía:	Plg, Fld K y Qtz, alt illita y otros	Jw	0.66	Fluencia de agua por goteo continuo con lavado de los rellenos de las diaclasas							
Recolector:	Wilfredy Morales	SRF	5	Una zona débil que contiene arcilla o roca alterada en superficie							
		Q	0.20499	Roca clasificada geomecánicamente como MUY MALA							
% SULFUROS											
Py	Cpy	Bo	Co	Mo	Cu	Mt	Ag	Au			
PROYECCIÓN GRÁFICA DEL AFLORAMIENTO					ESTEREOGRAFÍA						
DESCRIPCIÓN DEL AFLORAMIENTO											
<p>GEOLOGÍA (Litología, textura, mineralogía, color, tamaño de grano, alteración, dureza, etc). ALASKITA: con textura fanerítica y equigranular, de color verde claro y tamaño de cristal medio, la alteración que presenta es argílica baja y el grado de meteorización es III-IV, la dureza máxima para este afloramiento es R4, mientras en el cauce de la quebrada San Andres la dureza es R6 y solo se encuentra alterada hidrotermalmente. MINERALOGÍA: Alunita (Plg) 60%, Qtz 25%, Feld K 12% y Hbl-Esf-Hem con 3%. NOTA: En el afloramiento se encontraron pedazos de pequeñas bandas de Neis Hornbléndico medidas paralelas a S1, a demas de la presencia de enclaves máficos.</p>											
MAPEO ESTRUCTURAL											
DISCONTINUIDADES				Longitud	Espesamiento	Alteración	Apertura	Relleno	Rugosidad	Forma	Agua
Set N° Jn	Tipo de set	Dip (°)	Ddip (°)								
1	0	74	257	3	2 a 3	3	2	1	2	2	2
2	0	60	347	2	2 a 3	3	2	1	3	1	2
3	0	67	187	2	3	4	4	2	1	1 a 2	2
3	0	69	170								
3	0	57	162								
1	0	77	259								



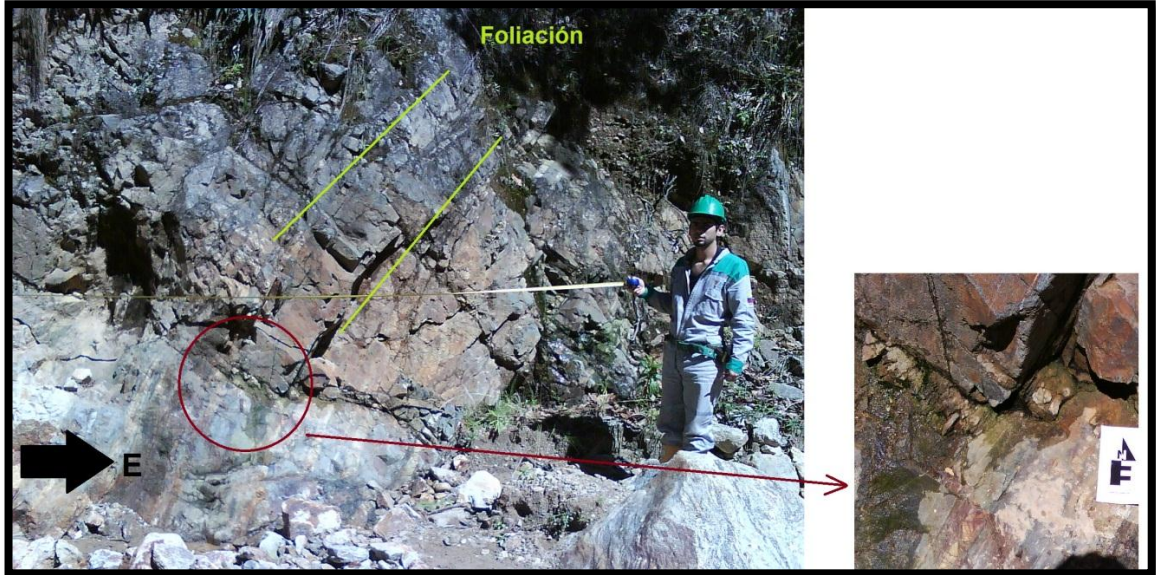
Algunos de los 25 formatos se encuentran en el anexo B, porque debido a las políticas de privacidad y confidencialidad de la empresa toda la información colectada no puede ser publicada.

De la tabla 18 y todas las observaciones de campo se puede concluir lo siguiente:

- Los rangos de calidad de macizo Q variaron entre 0.04375 (fotografía 11) y 3.1386 (fotografía 12), se determinó un valor medio de 0.8969884. Es decir, el macizo posee una calidad mínima Extremadamente mala y una calidad máxima Mala. El valor 0.04, fue tomado por defecto por el modelo de interpolación, debido a que fue el valor de clasificación Q de Barton de peor calidad calculado en superficie.
- Cuando la litología del macizo corresponde con neises cuarzo-feldespáticos o neises horbléndicos de grano grueso con foliación discontinua, la foliación contribuye poco con la formación de discontinuidades potenciales, por lo cual en algunos casos no fue considerada como familia o set principal dentro del macizo analizado. Mientras cuando la litología es neis biotítico principalmente de grano grueso con foliación continua, la foliación en este caso si es considerada como familia o set principal (fotografía 10) y dado que esta variedad litológica es la más importante dentro de la unidad litológica del Neis de Bucaramanga los datos de foliación son muy importantes.



Fotografía 11. Zona de cizalla simple asociada a la cinemática de la Falla La Baja, fotografía de perfil del frente de la galería H1.



- Según los datos puntuales de foliación tomados durante el trabajo de campo (tabla 19), foliación tiene dos principales tendencias en dirección de buzamiento: una primera con dirección aproximadamente hacia el norte (valores entre 330 y 360) y una segunda con dirección aproximadamente oeste (valores entre 260 y 290). Aunque promediando estos pocos en dips la media es: 303 / 47. Es decir, las direcciones de buzamiento generalmente se mantienen en el cuadrante NW y con buzamientos subverticales hasta moderados, pero generalmente entre 45 y 65°.
- En superficie se logró tomar un dato de plano de falla con estrías (estación D24), el dato del plano es 226 / 86 con un picht de 21°. Este plano de falla es aproximadamente perpendicular al plano de falla La Baja y sigue de manera aproximada también la dirección de la quebrada Páez, esta observación puntual podría indicar la presencia del otro sistema de fallas mencionado por Mantilla *et al.* 2011.



Tabla 19. Tabla de los datos de foliación, tomados en el trabajo de campo durante el levantamiento de líneas geotécnicas de superficie y subterráneas.

Estación	Dato estructural	
	DIP	DDIP
D4	67	254
D5	22	330
D7	67	254
D8	48	350
D10	55	357
D15	64	301
D19	59	350
D20	63	270
D21	59	329
S5	46	260

- Muchos de los afloramientos descritos se encuentran en la entrada a Bocaminas artesanales y en esos lugares se identificaron flujos de aguas subterráneas de poco caudal, resultado de la sumatoria de todos los goteos puntuales filtrados por las paredes de las discontinuidades y techos de dichas galerías, estos flujos son generalmente continuos para la mayoría de los casos, aunque en las galerías a mayor altitud el caudal va disminuyendo. Mientras en los afloramientos la surgencia de aguas subterráneas es nula, aunque en dos macizos se observaron goteos puntuales (fotografía 11).
- El grado de meteorización de las rocas ígneas y metamórficas en superficie generalmente es en promedio IV a mínimo III, aunque en algunos de los afloramientos descritos la meteorización apenas llega a ser de grado II (ver la tabla 3 para escala de meteorización).
- La moda para los valores del J_n es 12, es decir, tenemos un macizo rocoso en términos generales con tres familias de discontinuidades principales con diaclasas aleatorias, aunque los valores varían entre 9 y 15, como mínimo y máximo, respectivamente.



- La moda para los valores del SRF es 2.5, aunque alcanza a tomar valores de 10 como máximo (ver anexo 2).
- Las paredes de las discontinuidades principales generalmente en superficie presentan ligeras alteraciones y manchados con óxidos generalmente, mientras en las área cerca o con alteración hidrotermal o silicificación se presentan rellenos considerables (1 – 25 mm) de limonita roja a naranja (fotografía 11), provocando una reducción considerable de la estabilidad del macizo rocoso en estas zonas singulares.

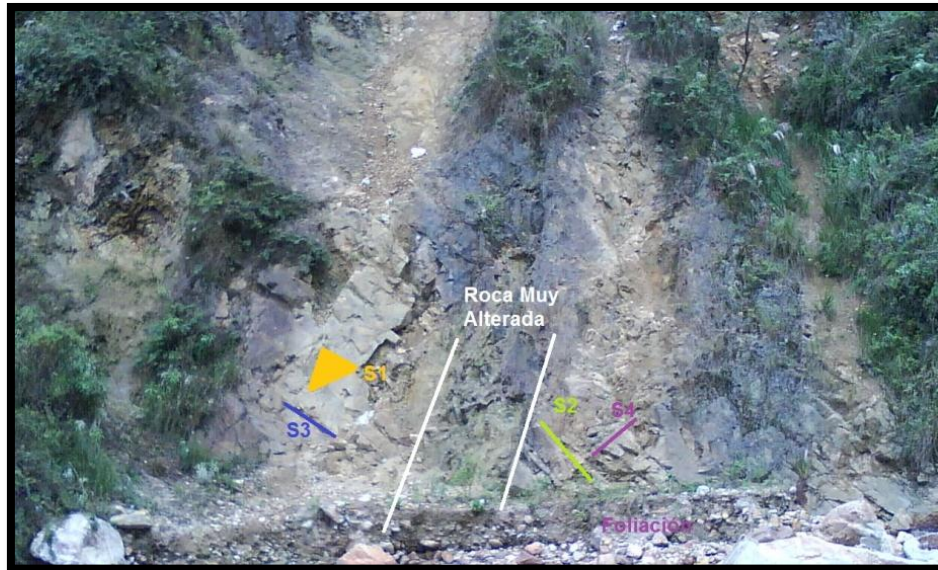
En las fotografías 12, 13 y 14 (ver anexo C, para ver todas fotos tomadas en campo), se observan las características anteriormente descritas, además en el anexo 2 están consignados algunos de los formatos de las estaciones levantadas en campo (trabajo en superficie y subterráneo) con todas sus descripciones.

Fotografía 12. Afloramiento D18, donde se identifican rocas de la brecha silicificada, con matriz rocosa de resistencia R6, pero con relleno de diaclasas con limonita y hematita.

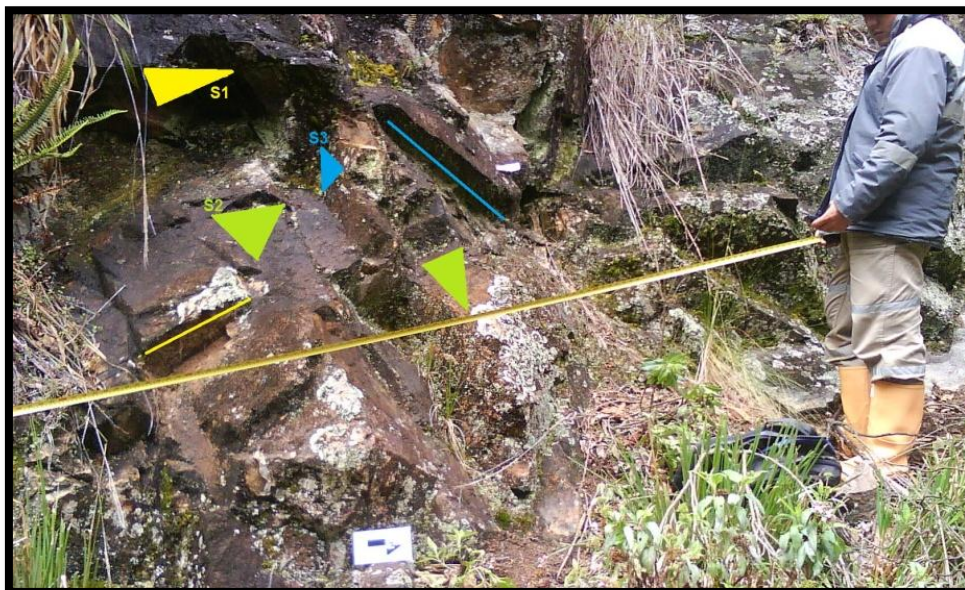




Fotografía 13. Afloramiento D5, donde se identifican una zona de roca muy meteorizada, un suelos residual, cuatros sets de diaclasas y valor de Q de 0.04. Base de la plataforma del emboquille del túnel de acceso 3.



Fotografía 14. Afloramiento D20, donde se identifican una zona de roca resistente algo meteorizada, formando bloques potenciales, tres sets de diaclasas y valor de Q de 1.90.





6.4. CORRELACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LAS DESCRIPCIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DE TESTIGOS

Cuando se diseñan excavaciones subterráneas o superficiales, el conocimiento geológico del yacimiento no es suficiente para suministrar la información requerida para realizar los diseños geomecánicos confiables, por lo tanto se deben considerar: sectorizaciones geomecánicas, propiedades físicas de los macizos rocosos, el comportamiento del macizo frente a voladuras, sectorización de riesgos, diseño de taludes para emboquilles, etc. El no contar con esta información representa un riesgo físico y económico significativo para el desarrollo de la actividad extractiva.

La fuente de datos que alimentan al modelo geométrico-geomecánico, son exclusivamente los datos de descripción geotécnica de núcleos, por lo cual se realizó una correlación entre los datos de litología definidas en las descripciones geológico de testigos y los datos de propiedades y clasificación geomecánica provenientes del logging geotécnico, para determinar las posibles relaciones existentes entre los cambios geológicos y los cambios de comportamiento y calidad del macizo rocoso que contendrá los túneles de acceso minero números 1 y 3.

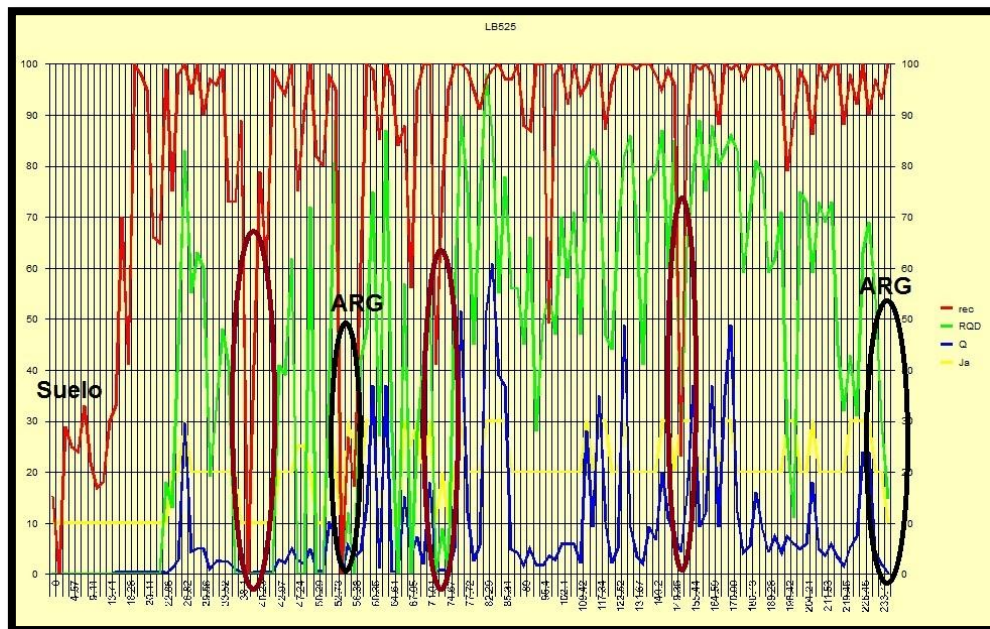
La roca caja o estéril corresponde mayoritariamente a las rocas metamórficas del neis de Bucaramanga, de composiciones mineralógicas y disposiciones diversas, se reconocen las variedades de: neis bandeado indiferenciado (neises biotíticos, neises intermedios y neis biotítico-hornbléndico), neis cuarzo feldespático, neis hornbléndico y anfibolita. El comportamiento geomecánico de esta unidad litoestratigráfica en superficie es de extremadamente malo a muy malo ($Q < 1$), dado por la meteorización natural de las rocas, con producción de suelo residual (Overbunder) de espesor considerable en algunos casos más de 20 m hasta llegar a la roca madre, en las figura 28 y 29 se indica el overbunder en el inicio de la



perforación (aproximadamente 22 y 10 m respectivamente) con baja recuperación, nulo RQD y Q.

La subunidad del neis bandeado indiferenciado (BG) compone mayoritariamente el macizo rocoso de interés. El comportamiento geomecánico de esta subunidad es generalmente medio a bueno, con valores de clasificación Q de Barton entre 4 y 40. Cuando el neis presenta alteración hidrotermal argílica en zonas no mineralizadas, los minerales de alteración disminuyen drásticamente las propiedades geotécnicas del macizo, pero máximo representan zonas con espesores de 3 m, generalmente son centimétricos. Se evidencio en el análisis individual de los sondeos (15 sondeos por túnel de acceso), que los parámetros y la calidad del macizo disminuye sustancialmente en las zonas mineralizadas (brechas) y/o las zonas adyacentes con alteración argílica alta o alteración propilítica alta, con todos los datos analizados aproximadamente un 50 % de los casos identificados y correlacionados respaldan esta hipótesis (Tablas 20 y21).

Figura 28. Gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 525 (cercana a Túnel 1).





En la tabla 20 se registran 15 sondeos adamantinos de exploración cercanos al trazo del eje del túnel de acceso número 1. Para cada una de las perforaciones se localizaron las profundidades de corte con las brechas mineralizadas de interés, Mascota y Gigante (HYBX y TBX), luego de acuerdo con la información de las alteraciones hidrotermales definidas en el proceso de logging geológico se especificaron los tipos de alteración antes y después que la perforación cortara la brecha, con sus respectivos espesores aproximados en metros escritos entre paréntesis, se tomaron 7 m como rango de influencia desde las brechas de acuerdo a lo observado en campo. Las casillas rellenas con color naranja indican que la calidad del macizo rocoso en dicho intervalo disminuye de manera importante ($Q < 1$), de igual manera como lo hacen los parámetros geomecánicos, estas disminuciones se observaron en un 60% de los casos analizados de zonas mineralizadas.

En la gráfica 28 se comparan visualmente los parámetros geomecánicos de recuperación, RQD y condiciones de las discontinuidades (J_a), junto con los valores de calidad del macizo rocoso dado por la clasificación geomecánica del Q de Barton, para el pozo LB 525. En la gráfica se identificó que los primeros 13 a 14 m la perforación corta el suelo, luego hasta los 22 m atravesó la roca madre alterada por meteorización severa, posteriormente al entrar en el macizo rocoso donde los parámetros y la calidad varían constantemente en magnitud, pero pueden ser agrupados de acuerdo con los rangos establecidos en la tabla 9. En la gráfica 28 se demarcaron cinco óvalos, los dos de color negro, los cuales tienen indicando el tipo de alteración (para el caso, argílica – ARG), mostrando las caídas de los parámetros y la calidad del macizo como resultado de alteración extrema de los minerales originales de la roca caja que se encuentra en contacto con la brecha mineralizada, en el primer caso a 53 m de profundidad la roca posee alteración argílica después de atravesar la HYBX y en el segundo caso a 232 m de profundidad la roca está silicificada (2 m) y roca con alteración argílica (5 m) al



atravesar la TBX. Mientras los otros tres óvalos de color rojizo encierran picos bajos que indican zonas de alteración o de cizalla enriquecidas en arcillas, pero dentro de la roca encajante sin contacto cercano a las brechas HYBX o TBX.

En estas zonas singulares mencionadas, el parámetro de la recuperación puede ser bueno o malo, sin tener repercusiones sobre los descensos de los demás parámetros y la calidad del macizo rocoso. El parámetro del Rock Quality Designation (RQD), presenta variaciones muy irregulares en esta perforación y en las 14 restantes ubicadas dentro del bloque estructural T1 (ver anexo D), desde 0 hasta 100, es decir, en todo el espectro de variación. También como regla general siempre es menor o igual al valor de recuperación. En cuanto a las variaciones del Ja o condiciones de las discontinuidades se mantienen generalmente en 20 puntos, aunque fluctúa entre 10 y 30. Cuando este parámetro aumenta disminuye, el valor de clasificación también lo hace, debido a que el Ja posee un peso importante en el cálculo del RMR que es luego transformado a valores de Q de Barton aplicando la fórmula (2).

La gráfica 28 presenta un inconveniente con la visualización de los valores de la clasificación del Q, debido que los rangos de esta clasificación son logarítmicos, por lo cual valores muy pequeños o muy grandes de la calidad presentan inconvenientes al graficarlos para compararlos. También otra consideración importante a tener en cuenta es que los valores del Q a utilizar como fuente de datos para el modelo de interpolación no se calcula directamente durante el proceso de logueo, es calculado el RMR y luego aplicando la fórmula (2) se halla el dato de Q. Otra observación importante es que en logging se descosen las zonas de aparición del agua subterránea, motivo por el cual este parámetro es constante y de valor máximo (discontinuidades secas), dando valores más optimista de los esperados realmente. Los valores de clasificación para el sondeo LB 525 varían entre un máximo de 61.014 y un mínimo de 0.295 del Q.



Tabla 20. Tabla de correlación entre zonas mineralizadas (HYBX y TBX) y disminuciones importantes de los parámetros y la clasificación geomecánica, para el túnel de acceso 1 (Comparar con las Gráficas del anexo D).

Pozo	Litología	Intervalo de profundidades (m)	Alteración superior (m)	Alteración en la brecha (m)	Alteración inferior (m)
LB 170	HYBX	99 a 100	ARG (3)	SIL (1)	ARG (3)
	TBX	136 a 137	ARG (1)	SIL (1)	ARG (3)
	HYBX	164 a 165	ARG (+)	SIL (1)	PRO (3)
	HYBX	170 a 172	PRO (1)	SIL (2)	ARG (+)
	HYBX	188 a 189	ARG (+)	SIL (1)	ARG (4)
	HYBX + T	192 a 194	ARG (4)	SIL (3)	ARG (3)
	HYBX	198 a 204	ARG (3)	SIL (6)	ARG (4)
	HYBX	208 a 209	ARG (4)	SIL (2)	ARG (+)
	TBX	231 a 232	ARG (+)	SIL (1)	ARG (3)
	TBX	235 a 242	ARG (3)	SIL (3+3 ARG)	ARG (1)
	HYBX	243 a 247	ARG (1)	SIL (4)	ARG (+)
	HYBX	260 a 263	ARG (+)	SIL (3)	ARG (3)
	HYBX	266 a 268	ARG (3)	SIL (2)	ARG (4)
LB 176	HYBX	147 a 148	ARG (3)	SIL (1)	PRO (+)
	HYBX	207 a 208	ARG (+)	SIL (1)	ARG (2)
	HYBX	220 a 221	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	248 a 252	ARG (+)	SIL (4)	ARG (6)
	HYBX	258 a 265	ARG (6)	SIL (7)	ARG (+)
	HYBX	277 a 281	ARG (+)	SIL (4)	ARG (4)
	HYBX	291 a 292	QSP (4)	SIL (2)	QSP (2)
	HYBX	295 a 298	QSP (2)	SIL (3)	ARG (2)
	HYBX	302 a 324	ARG (1)	SIL (22)	ARG (1)
	HYBX	325 a 333	ARG (1)	SIL (8)	PRO (+)
	HYBX	360 a 364	ARG (+)	SIL (4)	ARG (1)
	HYBX	365 a 371	ARG (1)	SIL (6)	ARG (+)
LB 186	TBX	30 a 31	ARG (1)	SIL (1)	ARG (6)
	HYBX	162 a 163	ARG (1)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	225 a 226	ARG (1)	SIL (2)	ARG (1)
	HYBX	241 a 248	ARG (5)	SIL (7)	ARG (+)
	TBX	256 a 259	ARG (+)	SIL (3)	ARG (1)
	TBX	277 a 279	ARG (3)	SIL (2)	SIL (+)
	HYBX	281 a 282	SIL (+)	SIL (4)	ARG (5)
	HYBX	307 a 308	SIL (+)	SIL (1)	ARG (1)
HYBX	315 a 316	ARG (4)	SIL (1)	PRO (+)	



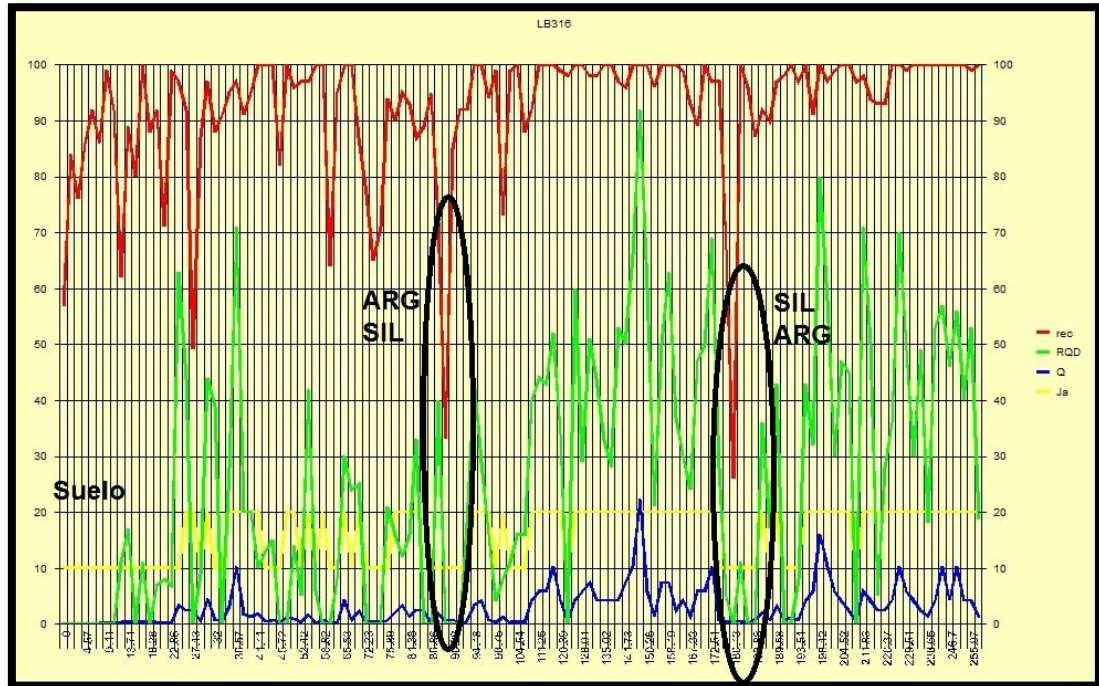
LB 190	HYBX	25 a 26	PRO (2)	SIL (1)	ARG (1)
	HYBX	141 a 143	PRO (5)	SIL (2)	PRO (+)
	HYBX	181	ARG (+)	SIL (1)	ARG (2)
	HYBX	221 a 223	SIL (3)	SIL (2)	SIL (+)
	HYBX	255 a 263	SIL (6)	SIL (9)	SIL (2)
	HYBX	290 a 291	SIL (1)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	297 a 298	ARG (5)	SIL (1)	ARG (+)
	TBX	304 a 311	ARG (+)	SIL (7)	SIL (+)
	HYBX	313 a 327	SIL (+)	SIL (14)	ARG (2)
	HYBX	329 a 332	ARG (2)	SIL (3)	ARG (3)
	HYBX	365 a 366	ARG (+)	SIL (1)	ARG (3)
	HYBX	417 a 420	PRO (+)	SIL (3)	ARG (1)
LB 195	HYBX	151 a 152	ARG (1)	SIL (2)	PRO (+)
	HYBX	251 a 254	QSP (6)	SIL (3)	ARG (+)
	HYBX	358 a 361	PRO (1)	SIL (3)	ARG (+)
	HYBX	402 a 432	ARG (1)	SIL (30)	ARG (3)
LB 206	HYBX	294 a 298	ARG (+)	SIL (4)	ARG (3)
LB 239	HYBX	31 a 32	ARG (+)	SIL (1)	ARG (1)
	HYBX	162 a 163	ARG (2)	SIL (1)	ARG (5)
	HYBX	246 a 248	ARG (1)	SIL (2)	ARG (1)
	HYBX	249 a 250	ARG (1)	SIL (1)	ARG (2)
	HYBX	274 a 275	QSP (+)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	305 a 311	ARG (+)	SIL (6)	ARG (+)
	HYBX	337 a 338	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	393 a 394	ARG (4)	SIL (1)	ARG (1)
	HYBX	415 a 420	ARG (+)	SIL (5)	ARG (2)
	HYBX	422 a 424	ARG (2)	SIL (2)	ARG (+)
	HYBX	438 a 439	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	454 a 455	ARG (+)	SIL (1)	ARG (3)
	HYBX	458 a 460	ARG (3)	SIL (2)	SIL (+)
HYBX	489 a 492	SIL (4)	SIL (3)	ARG (+)	
LB 248	HYBX	59 a 61	ARG (1)	SIL (2)	ARG (4)
	TBX	191 a 193	ARG (1)	SIL (2)	ARG (2)
	HYBX	253 a 255	ARG (3)	SIL (2)	PRO (5)
	HYBX	271 a 272	ARG (+) III	SIL (1)	II ARG (+)
	HYBX	295 a 299	SIL (3)	SIL (4)	ARG (1)
	HYBX	312 a 316	SIL (+)	SIL (4)	ARG (+)
	TBX	339 a 340	ARG (5)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	391 a 393	ARG (+)	SIL (2)	ARG (+)
	TBX	512 a 513	ARG (+)	QSP (1)	ARG (2)
	TBX	515 a 516	ARG (2)	QSP (1)	ARG (1)
	HYBX	520 a 521	SIL (3)	SIL (1)	SIL (2)
	HYBX	526 a 528	QSP (1)	SIL (2)	SIL (2)
	HYBX	535 a 538	ARG (5)	SIL (3)	ARG (2)



LB 351	HYBX	49 a 55	ARG (+)	SIL (6)	ARG (2)
	HYBX	170 a 176	ARG (+)	SIL (6)	ARG (1)
	HYBX	177 a 178	ARG (1)	SIL (1)	ARG (+)
	TBX	279 a 284	ARG (2)	SIL (5)	ARG (5)
	HYBX	315 a 317	ARG (+)	SIL (2)	ARG (6)
	HYBX	323 a 324	ARG (6)	SIL (1)	ARG (1)
	HYBX	343 a 344	PRO (+)	SIL (1)	SIL (+)
	HYBX	352 a 353	ARG (2)	SIL (1)	ARG (+)
LB 360	HYBX	50 a 53	ARG (1)	SIL (3)	ARG (3)
	HYBX	135 a 136	ARG (1)	SIL (1)	ARG (1)
	TBX	138 a 139	ARG (1)	SIL (1)	ARG (1)
	TBX	229 a 233	ARG (+)	SIL (4)	ARG (1)
	TBX	234 a 237	ARG (1)	ARG (3)	ARG (+)
	HYBX	257 a 258	ARG (1)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	277 a 281	ARG (+)	SIL (4)	PRO (+)
	HYBX	322 a 324	ARG (+)	SIL (2)	ARG (+)
LB 428	HYBX	84 a 87	PRO (6) I	SIL (3)	PRO (+)
	TBX	161 a 162	ARG (1)	SIL (1)	ARG (1)
	HYBX	313 a 315	ARG (5)	SIL (2)	ARG (2)
	TBX	334 a 336	PRO (1)	SIL (2)	SIL (3)
	TBX	355 a 357	PRO (3)	SIL (2)	ARG (+)
	TBX	364 a 369	SIL (2)	SIL (5)	ARG (3)
	TBX	372 a 375	ARG (3)	SIL (3)	SIL (5)
	HYBX	375 a 380	SIL (3)	SIL (5)	ARG (5)
	HYBX	472 a 475	ARG (5)	SIL (3)	ARG (2)
LB 459	TBX	413 a 423	ARG (+)	SIL (4+6arg)	ARG (2)
	HYBX	457 a 460	ARG (+)	SIL (3)	ARG (3)
LB 487	HYBX	423 a 426	ARG (6)	SIL (3)	ARG (4)
	HYBX	430 a 455	ARG (4)	SIL (25) III	ARG (+)
LB 525	HYBX	51 a 53	SIL (+)	SIL (2)	ARG (2)
	TBX	143 a 144	ARG (3)	SIL (2)	ARG (+)
	TBX	228 a 230	SIL (4)	SIL (2)	ARG (2)
	TBX	232 a 237	ARG (2)	SIL (ARG5+2)	FIN CORE
LB 531	TBX	120 a 123	PRO (+)	ARG (3)	ARG (4)
	TBX	360 a 366	ARG (2)	SIL (6)	ARG (2)
	HYBX	377 a 379	ARG (+)	SIL (2)	ARG (4)
	HYBX	383 a 386	ARG (4)	SIL (3)	ARG (3)
	TBX	389 a 390	ARG (3)	SIL (2)	ARG (3)
	TBX	393 a 395	ARG (2)	ARG (2)	PRO (6)
	TBX	415 a 421	ARG (+)	SIL (4+2ARG)	ARG (+)
		Para más de 7 m	(+)		



Figura 29. Gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 316 (cercana a Túnel 3).



En la tabla 21 se registran 15 sondeos adamantinos de exploración cercanos al trazo del eje del túnel de acceso número 3. Para cada una de las perforaciones se localizaron las profundidades de corte con las brechas mineralizadas de interés, Mascota y Gigante (HYBX y TBX), luego de acuerdo con la información de las alteraciones hidrotermales definidas en el proceso de logging geológico se especificaron los tipos de alteración antes y después que la perforación cortara la brecha, con sus respectivos espesores aproximados en metros escritos entre paréntesis, se tomaron 7 m como rango de influencia desde las brechas de acuerdo a lo observado en campo. Las casillas rellenas con color naranja indica que la calidad del macizo rocoso en dicho intervalo disminuye de manera importante ($Q < 1$), de igual manera como lo hacen los parámetros geomecánicos, estas disminuciones se observaron en un 67% de los casos analizados de zonas mineralizadas.



En la gráfica 29 se comparan visualmente los parámetros geomecánicos de recuperación, RQD y condiciones de las discontinuidades (Ja), junto con los valores de calidad del macizo rocoso dado por la clasificación geomecánica del Q de Barton, para el pozo LB 316. En la gráfica se identificó que los primeros 10 m la perforación corta el suelo, luego hasta los 18 m atravesó la roca madre alterada por meteorización severa, posteriormente al entrar en el macizo rocoso donde los parámetros y la calidad varían constantemente en magnitud, pero pueden ser agrupados de acuerdo con los rangos establecidos en la tabla 9.

En la gráfica 29 se demarcaron dos óvalos de color negro, donde se indica el tipo de alteración (para el caso, argílica – ARG con silicificación - SIL), mostrándolos descensos más importantes de los parámetros y la calidad del macizo asociado con la alteración intensa de los minerales originales de la roca caja que se encuentra en contacto con la brecha mineraliza, en el primer caso entre el rango de 85-91 m de profundidad la roca posee alteración argílica después de atravesar la brecha silicificada HYBX y en el segundo caso a 180 m de profundidad la roca es la brecha HYBX silicificada (5 m) con roca vecina con alteración argílica (2 m) al atravesar la brecha.

En estas zonas singulares mencionadas, el parámetro de la recuperación puede ser bueno o malo, sin tener repercusiones sobre los descensos de los demás parámetros y la calidad del macizo rocoso.

El parámetro del Rock Quality Designation (RQD), presenta variaciones muy irregulares en esta perforación y en las 14 restantes ubicadas dentro del bloque estructural T3 (ver anexo D), desde 0 hasta 92, es decir, en casi la totalidad del espectro de variación del parámetro RQD. También como regla general siempre es menor o igual al valor de recuperación.



En cuanto a las variaciones del Ja o condiciones de las discontinuidades inicialmente fluctúa entre 10 y 20, pero a partir de los 100 m de profundidad del pozo LB 316 el Ja se mantiene de manera aproximada en 20 puntos. Cuando este parámetro aumenta disminuye, el valor de clasificación también lo hace, debido a que el Ja posee un peso importante en el cálculo del RMR que es luego transformado a valores de Q de Barton aplicando la fórmula (2).

Los valores de clasificación para el sondeo LB 525 varían entre un máximo de 22.446 y un mínimo de 0.236 del Q.

De la tabla 21, también se puede definir que cuando aparece la brecha TBX junto con la alteración Filica (QSP), la calidad del macizo en estas zonas son afectadas de manera negativa, generadas principalmente por la formación de esméctita y otras arcillas geomecánicamente muy malas (arcillas expansivas). Estas zonas aparecen mayoritariamente en las zonas donde se localiza la brecha mineralizada de El Gigante (TBX). En general el volumen de macizo rocoso cercano a la brecha tectónica de El Gigante presenta un comportamiento geotécnico más malo comparado con La Mascota (según las observaciones del grupo de logging), principalmente debido a que la zona de la Falla La Baja corta la brecha en varias partes y la alteración hidrotermal es más intensa, ya sea en alteración ARG o QSP.



Tabla 21. Tabla de correlación entre zonas mineralizadas (HYBX y TBX) y disminuciones importantes de los parámetros y la clasificación geomecánica, para el túnel de acceso 3 (Comparar con las Gráficas del anexo D).

Pozo	Litología	Intervalo de profundidades (m)	Alteración superior (m)	Alteración en la brecha (m)	Alteración inferior (m)
LB 367	HYBX	147 a 150	ARG (5)	SIL (5)	ARG (5)
	HYBX	190 a 191	PRO (2)	SIL (1)	ARG (2)
LB 279	HYBX	306	ARG (3)	SIL (1)	ARG (3)
	HYBX	399 a 401	ARG (+)	SIL (2)	ARG (2)
	HYBX	500 a 507	ARG (+)	SIL (7) II	ARG (4)
LB 277	TBX	243 a 245	ARG (+)	ARG (2)	ARG (+)
LB 271	TBX	27 a 28	ARG (+)	ARG (1)	ARG (+)
	HYBX	137 a 138	ARG (2)	SIL (2) +/-	ARG (2)
	HYBX	239 a 240	ARG (1)	SIL (2) Q	PRO (2)
	HYBX	556 a 557	ARG (2)	SIL (2)	ARG (2)
	TBX	568 a 574	ARG (7)	SIL (6) I	QSP (3)
LB 266	TBX	162 a 163	ARG (1)	SIL (2) +/-	ARG (2)
	TBX	341 a 342	ARG (3)	SIL (1)	ARG (3)
	HYBX	464 a 465	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
LB 264	HYBX	72 a 75	ARG (4)	SIL (4)	ARG (2)
	HYBX	145 a 153	ARG (3)	SIL (8)	ARG (4)
	HYBX	507 a 508	QSP (1)	SIL (1)	QSP (3)
LB 263	HYBX	107 a 108	III ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	139 a 140	ARG (+)	SIL (1)	ARG (2) +/-
LB 260	HYBX	76	ARG (3)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	84 a 85	ARG (+)	SIL (1)	PRO (+)
LB 256	HYBX	48 a 49	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	TBX	57 a 58	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	177 a 179	ARG (+)	SIL (4)	ARG (2)
	TBX	180 a 181			
	HYBX	182 a 183	ARG (2)	SIL (6) III	ARG (+)
	TBX	184 a 189			
LB 252	HYBX	52 a 53	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	60 a 62	ARG (+)	SIL (2)	ARG (+)
	HYBX	141 a 142	ARG (3)	SIL (2)	ARG (2)
	HYBX	178	ARG (4)	SIL (1)	ARG (3)
	HYBX	187	ARG (3)	SIL (1)	SIL (1)
	TBX	207 a 208	PRO (+)	QSP (1)	ARG (2)
	TBX	216 a 223	PRO (2)	QSP (7)	PRO (+)
	TBX	255 a 257	PRO (2)	QSP (2)	PRO (1)
	TBX	317 a 319	PRO (+)	QSP (2)	ARG (+)



LB 246	TBX	53 a 54	ARG (+) II	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	166 a 168	ARG (+)	SIL (2)	ARG (1)
	HYBX	169 a 170	ARG (1)	SIL (1)	ARG (+)
	TBX	440 a 441	ARG (2)	QSP (1)	ARG (+)
	TBX	462 a 463	PRO (2)	QSP (1)	VI PRO (+)
LB 241	HYBX	145 a 147	ARG (+)	SIL (2)	ARG (+)
	TBX	239 a 240	ARG (2)	SIL (1)	PRO (+)
	HYBX	366 a 367	ARG (+)	SIL (1)	ARG (+)
	TBX	416 a 417	ARG (+)	SIL (4)	ARG (+)
	HYBX	418 a 419			
	TBX	419 a 420			
	TBX	421 a 425	ARG (+)	ARG (5)	ARG (+)
LB 226	TBX	265 a 266	PRO (+)	SIL (1)	ARG (3)
	TBX	331 a 332	ARG (1)	SIL (1)	ARG (4)
	HYBX	336 a 337	ARG (4)	SIL (1)	PRO (+) +/-
LB 342	TBX	138 a 139	ARG (+)	SIL (1)	PRO (1)
	TBX	262 a 264	ARG (3)	SIL (2)	ARG (+)
	HYBX	275 a 276	ARG (+) V	SIL (1)	ARG (2)
LB 316	HYBX	86 a 87	ARG (+)	SIL (1)	ARG (2)
	HYBX	90	ARG (2)	SIL (1)	ARG (5)
	HYBX	147	ARG (2)	SIL (1)	ARG (3)
	HYBX	162 a 169	ARG (+)	SIL (10)	ARG (+)
	HYBX	176 a 181	ARG (+)	SIL (5)	ARG (2)
	HYBX	183	ARG (2)	SIL (1)	ARG (+)
	HYBX	207 a 211	ARG (+)	SIL (5) II	ARG (+)
	(+)	Para más de 7 m			



6.5. LÍNEAS GEOTÉCNICAS EN GALERIAS

Para cumplir con los objetivos planteados, el levantamiento de líneas geotécnicas subterráneas es de vital importancia para conocer la geología y el comportamiento geomecánico de tramos del macizo rocoso en profundidad, ya que en superficie el macizo rocoso aflora de manera escasa, las rocas presentan meteorización y solo se tiene una visión bidimensional.

Por motivos de inseguridad y/o no tener permiso de los habitantes de la región dueños de predios, solo se habilitó por parte de la empresa para la toma de datos, la visita a seis galerías artesanales: TG-1, TG-2, H1, H2, H3 y La Minita. Las galerías cortan principalmente la brecha hidrotermal de La Mascota. También se realizaron observaciones y se tomaron algunos datos puntuales en el frente del túnel de acceso número 1.

Se levantaron cinco líneas geotécnicas subterráneas en total, una por cada bocamina, en tres metros lineales por sección de túnel, donde se tomaron 450 datos estructurales de familias de diaclasas principales. Las cinco galerías se encuentran en la zona de influencia del túnel de acceso 1 (bloque estructural T1), los 450 datos subterráneos se procesaron en DIPS, para luego combinarlos con la información de las 9 estaciones de levantamiento de líneas geotécnicas en superficie dentro del bloque T1.

El formato utilizado para la toma de los datos en campo en el levantamiento de líneas geotécnicas subterráneas es el mismo de las figuras 8 y 21, es decir, el mismo utilizado en el trabajo de superficie, la única modificación es el dibujo, porque este se realiza de la sección de la galería o túnel (Hastiales y Bóveda). Los formatos se encuentran en el anexo 2.



Tabla 22. Localización, número de estructuras medidas y valores de índice Q de Barton, para las 5 líneas geotécnicas levantadas en campo.

Código línea geotécnica	Coordenada X	Coordenada Y	Número de Estructuras	Nombre Galería	Valor Q
S1	1'307.893	1'129.788	74	H2	1.41
S2	1'307.893	1'129.788	100	H1	0.572
S3	1'307.863	1'129.671	82	La Minita	1.86
S4	1'307.402	1'129.441	107	TG1	0.0375
S5	1'307.390	1'129.433	88	TG2	1.57

De acuerdo con lo consignado en la tabla 22 y la información registrada en los formatos de campo con las observaciones personales realizadas durante el levantamiento de líneas geotécnicas subterráneas, se puede concluir:

Según los valores de calculados del Q de Barton subterráneos (tabla 20), la calidad de los macizos rocosos levantados varían entre 0.0375 y 1.86, es decir, el macizo posee una calidad máxima Extremadamente mala y una calidad máxima Mala. Estos valores bajos de clasificación geomecánica se deben principalmente a que estás galerías artesanales antiguas se encuentran ubicadas cerca de superficie, en todas se encontraron zonas de fallas locales y presencia de flujo de agua, parámetros que contribuyen a disminuciones importantes del valor final de la calidad del macizo rocoso (los parámetros serán descritos con detalle a continuación).



Fotografía 15. Techo del túnel H1 a 8 m del emboquille, donde se identifican una zona de roca con alteración argílica alta, generando una sobre excavación de 0.75 m de ancho por 1.20 m alto.



Se encontró que en las zonas de alteración hidrotermal propilítica (PRO) alta, en los neises bandeados intermedios (Hbl, Fld K, Plg y Qtz), la calidad del macizo rocoso decae debido a la fuerte alteración de los minerales de hornblenda a clorita sumado con rellenos de fracturas importantes de epidota. Mientras en zona de alteración argílica alta del Neis de Bucaramanga los minerales que componen la roca han sido reemplazados casi en su totalidad, causando un comportamiento geomecánico muy similar al de un suelo, debido a que estos minerales de alteración son principalmente arcillas (limonita, illita, Sericita, caolinita) y micas (clorita), como se observa en la fotografía 15. En la fotografía se muestra una sobre excavación producida por una zona de alteración argílica alta en el Neis Bucaramanga a 8 m desde el emboquille en el túnel H1, antes de atravesar una pequeña zona mineralizada, las dimensiones son 0.75 m de ancho por 1.20 m de alto, está zona está enriquecida en minerales arcillosos reblandecibles como illita, caolinita y alunita. El mecanismo de falla del macizo rocoso en estas zonas



singulares son derrumbes del material rocoso arcilloso reblandecido de la bóveda y hastiales por falta de cohesión.

Fotografía 16. Hastial con diaclasas muy abiertas, que posee un flujo de agua subterránea continuo a 7 m desde el frente de la galería H2.

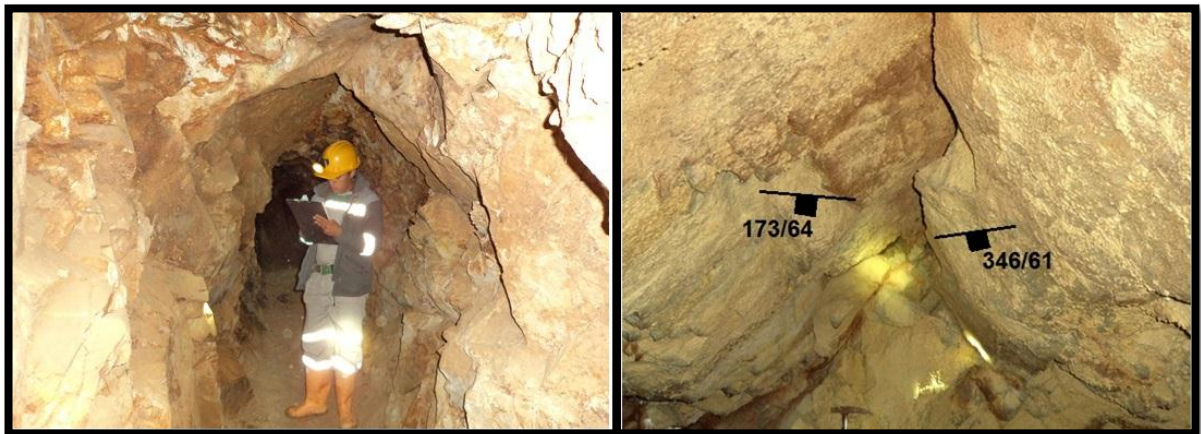


Las minas artesanales H1, H3, La Minita y TG2, no presentan un flujo de agua subterránea; mientras en H2, TG1 y en el túnel de acceso 1, el flujo de agua es importante y aparentemente continuo. Por ejemplo, actualmente en túnel 1 produce un caudal promedio aproximadamente constante de 31 a 32 litros/segundo, con un pH de entre 6.3 y 7.7 y una temperatura promedio de 21° C (datos suministrados por Ambiental – AUX Colombia SAS). En la galería TG1 la presión del agua subterránea derrumbo el frente para poder fluir, con un caudal aproximado 0.5 litros/segundo. Mientras en el hastial derecho de la galería H2 a 7 desde el frente, el agua subterránea fluye por dos diaclasas pertenecientes la misma familia (sets regional 2 con dato 152/60), con un caudal aproximado de 10 litros/segundo constante (fotografía 16) y una apertura importante de más de 15 cm. Todas las galerías visitadas presentan goteos puntuales en sus diferentes



trazados, con algunas zonas secas. Las observaciones del comportamiento del agua respaldan el modelo conceptual de un nivel freático subparalelo a la superficie del terreno, pero con unas líneas de flujo dentro del macizo muy poco predecibles, debido a que el agua sigue fracturas aleatorias del macizo.

Fotografía 17. Entrada al túnel TG2 y techo del túnel H2 a 10 m del frente, donde se identifica el principal mecanismo de falla del macizo rocoso de buena calidad.



En la fotografía 17, se identifica el principal mecanismo de inestabilidad de los túneles de acceso y desarrollo minero del proyecto, conocido con el nombre de caída de bloques o cuñas, formadas por la intersección de planos de discontinuidad (planos de diaclasas, foliación y fallas), cuando el macizo rocoso posee calidades aceptables a buenas, definido según lo observado en las galerías artesanales y el túnel de acceso número 1, Aunque a profundidades mayores la presión litostática juntos con la presión de poro ejercida por el agua subterránea, podrían generar falla del macizo rocoso por el mecanismo de estallido de rocas (hipótesis a debatir con las observaciones futuras durante la construcción de túneles de acceso y producción).



En la fotografía 18, se muestra una de las zonas donde se encontró la brecha mineralizada La Mascota, con espesores desde 1 hasta 3 metros y con buzamientos subverticales (mayores a 70°), la fotografía fue tomada en la intersección entre el túnel H2 y el túnel transversal que comunica a los túneles de Las Haches

Fotografía 18. Sobre excavación antrópica realizada en la brecha hidrotermal (Mascota), en la intersección túnel H2 y túnel transversal conector de las Haches.



En la fotografía 19, se ilustran las estalactitas producto de la precipitación de minerales de hierro (color café) y carbonatos de cobre (color azul verdoso), formados por la disolución de los sulfuros de la brecha que contienen estos metales y posteriormente precipitados por el goteo en los techos y hastiales de los túneles.



Fotografía 19. Estalactitas, frente del túnel H1 (izquierda) y H superior (derecha).



6.6. ANÁLISIS DE DISCONTINUIDADES CON DIPS 5.103

Posterior a la toma de los **2534** datos estructurales, se procedió con el respectivo procesamiento de los mismos, para generar los modelos geomecánicos sensu stricto. Para la realización del análisis estructural preliminar se utilizó el software Dips, para después en llevar los resultados al software Unwedge.

Dips es uno de los software de la casa Rocscience Inc. del doctor Hoek, diseñado para el análisis interactivo de orientación basado en datos de geología estructural. El programa es capaz de muchas aplicaciones y está pensado para el uso fácil, incluso para los nuevos usuarios. Excelente programa para los usuarios expertos en el uso de proyecciones estereográficas que deseen utilizar las herramientas más avanzadas en el análisis de datos geológicos. *Dips* permite al usuario analizar y visualizar datos estructurales siguiendo las mismas técnicas utilizadas en stereonets manuales. Además, tiene muchas funciones computacionales, como el contorno estadístico de agrupamiento de orientación, cálculo del promedio de orientaciones, la variabilidad de grupo y análisis de atributos cuantitativos y cualitativos.



Las diaclasas son las estructuras de mayor importancia en el análisis de estabilidad para los túneles de interés, se definen como planos de discontinuidad, donde se excluye la existencia de desplazamientos perceptibles entre ambos bloques y cuyo origen está relacionado con un proceso de rotura tensional y/o de cizalla, por tanto los planos de diaclasas pueden guardar con los ejes de esfuerzos dos tipos de relación:

- Una asociación a planos tensionales puros, perpendiculares a σ_3 .
- Ligados a planos de cizalla puros donde el ángulo diedro mínimo entre dos familias conjugadas es disectado por el eje σ_1 (Arlegui y Simon, 1993).

Aunque puede darse una situación intermedia representada por planos híbridos de cizalla y tensión (Hancock, 1985).

En el anexo C, se encuentran todos las gráficas de falsillas con mapas densidades de polos y las ciclográficas de los sets, para cada estación individual, los bloques T1 y T3, el trabajo conjunto subterráneo y finalmente de todos los datos estructurales tomados en campo.

6.6.1. Análisis estructural estadísticos para Bloque T1

Para la realización del análisis estructural de las familias de discontinuidades más relevantes para el macizo que contiene el túnel de acceso 1, se realizó la toma de datos en superficie en la ladera noroeste del cañón de la quebrada La Baja y en conjunto con la toma de datos en líneas geotécnicas subterráneas. De las 30 estaciones (D o S) donde se levantaron las líneas geotécnicas de superficie y subterráneas (D y S, respectivamente), se utilizaron las siguientes 14 estaciones para el análisis respectivo: D1, D2, D3, D14, D15, D17, D20, D22, D25, S1, S2, S3, S4 y S5.



Las fracturas en general se presenta cerradas y ocasionalmente con aberturas importantes, también en zonas singulares las paredes de las discontinuidades poseen rellenos de arcillas reblandecibles, superficies rugosas y planas generalmente, la persistencia varía entre 2-10 m, el número de familias de discontinuidades varía entre 3 sets y 3 sets más aleatorias (Jn de 9 y 12), por lo cual se puede definir que el macizo rocoso de interés presenta un fracturamiento importante. En la figura 30, se ilustra la falsilla de Wulf (estereonet de igual ángulo), con su respectivo mapa de densidad de polos (total de polos 1139), a partir del cual se determinó estadísticamente el polo y respectiva ciclográfica, que caracteriza a cada una de las tres familias de discontinuidades principales definidas para el macizo rocoso perteneciente al bloque de macizo rocoso T1. Una observación importante, corresponde con una zona grande de densidad de polos intermedia, que aparece con mayor densidad relativa en el análisis estructural estadístico de los datos subterráneos, en ese apartado se debatirá con más detalle. Las tres familias poseen las mismas relaciones con el fallamiento y foliación definidas en el análisis estructural general, visto en el apartado 6.2.

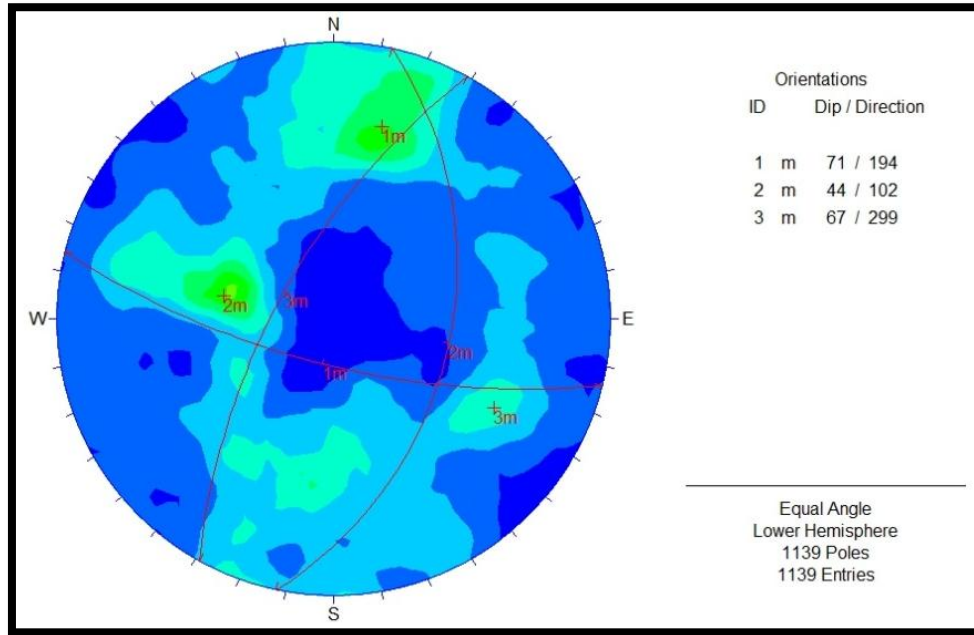
Las direcciones de buzamiento y magnitudes de buzamiento predominantes que presentan los tres sets de discontinuidades son:

- Set 1 = 194 / 71.
- Set 2 = 102 / 44.
- Set 3 = 299 / 67.

Estos datos determinan el sistema de cuñas que forman las discontinuidades presentes en el macizo rocoso, datos que serán importados al software Unwedge, para generar el modelo geotécnico de estabilidad de cuñas del Bloque T3.



Figura 30. Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), para el macizo rocoso que contiene el Túnel 1.



6.6.2. Análisis estructural estadístico subterráneo

Para la realización del análisis estructural de las familias de discontinuidades a partir de los datos obtenidos en los levantamientos subterráneos, es decir, se utilizaron las cinco líneas geotécnicas levantadas en el trabajo subterráneo: S1, S2, S3, S4 y S5. Para un total de 451 datos estructurales procesados en el software Dips.

En la figura 31, se muestra la falsilla de Wulf con su respectivo mapa de densidad de polos, a partir del cual se determinó estadísticamente el polo y respectiva ciclográfica, que identifica cada una de las tres familias de discontinuidades principales del macizo rocoso en profundidad. Lo importante de mostrar este resultado es debido al comportamiento de la tercera familia discontinuidades, porque cambia definitivamente, de encontrarse buzando en superficie en dirección

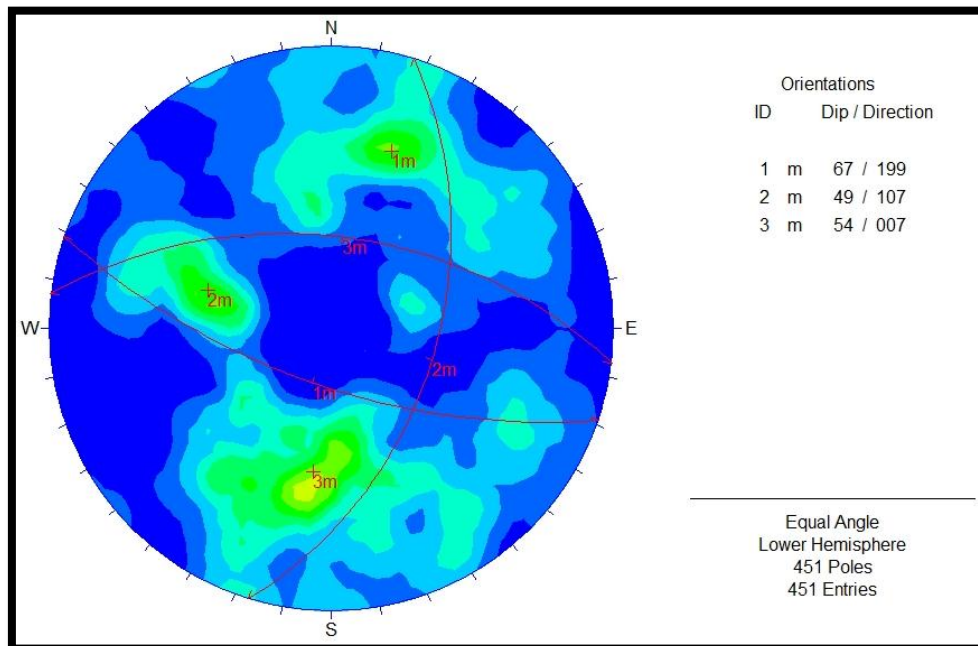


oeste pasa a buzarse en profundidad en dirección norte, este cambio parece estar relacionado con los cambios de la foliación metamórfica de las rocas néisicas a medida que se profundiza en el macizo rocoso. Mientras las familias 1 y 2, no presenta mayores variaciones en su dirección (sets relacionados con el fallamiento local). Unos datos tomados en el frente del túnel 1 (dato a: 197/61; dato b: 96/57; dato c: 07/43), son comparables con obtenidos en este análisis subterráneo, actualmente el túnel lleva 148 metros de avance y su construcción se encuentra detenida.

Las direcciones de buzamiento y magnitudes de buzamiento predominantes que presentan los tres sets de discontinuidades son:

- Set 1 = 199 / 67
- Set 2 = 107 / 49
- Set 3 = 007 / 54

Figura 31. Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), definidas con los datos de trabajo subterráneo.





6.6.3. Análisis estructural estadísticos para Bloque T3

El análisis estructural de las familias de discontinuidades importantes para el túnel de acceso 3, se realiza solo con los datos tomados en superficie en la ladera noroeste del cañón de la quebrada La Baja, debido a impedimentos con acceso: no autorización a los predios donde localizan las galerías artesanales en cercanías a este túnel. De las 25 estaciones (deltas – D) donde se levantaron las líneas geotécnicas superficiales, se utilizaron las siguientes 16 estaciones para el análisis estadístico: D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D16, D18, D19, D21, D23, D24.

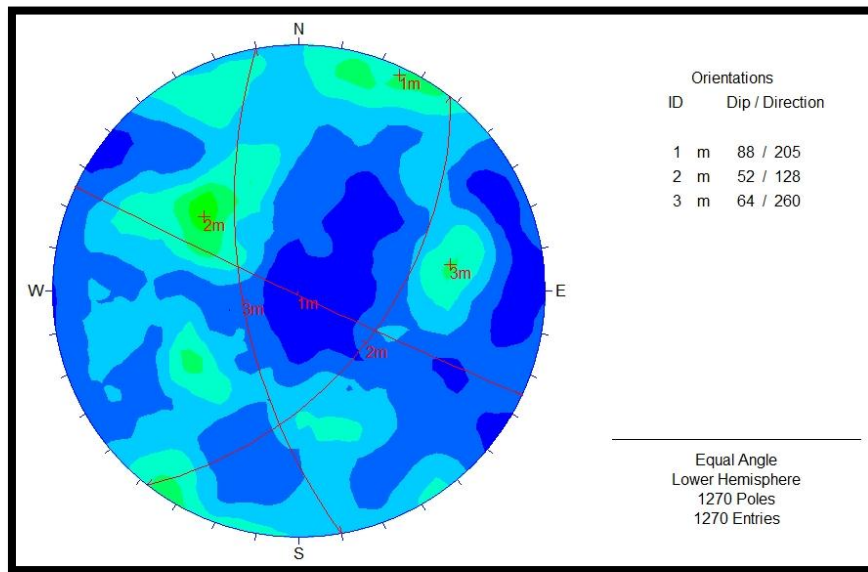
Las fracturas en general se presenta cerradas y ocasionalmente con aberturas importantes, también en zonas singulares las paredes de las discontinuidades poseen rellenos de arcillas reblandecibles, superficies rugosas, su continuidad es bastante variable (desde algunos decímetros a más de 10 m), su frecuencia varía entre 3 y 4 sets más aleatorias (J_n entre 9 y 15), por lo cual se puede definir que el Bloques de macizo rocoso T3 como fuertemente fracturado en superficie. En la figura 32, se ilustra la falsilla de Wulf (estereonet de igual ángulo), con su respectivo mapa de densidad de polos (total de polos 1270), a partir del cual se determinó estadísticamente el polo y respectiva ciclográfica, que caracteriza a cada una de las tres familias de discontinuidades principales definidas para el macizo rocoso perteneciente al bloque de macizo rocoso T3. Las tres familias poseen las mismas relaciones con el fallamiento y foliación definidas en el análisis estructural general, visto en el apartado 6.2. Estos datos determinan el sistema de cuñas que forman las discontinuidades presentes en el macizo rocoso, datos que serán importados al software Unwedge, para generar el modelo geotécnico de estabilidad de cuñas del Bloque T3.

Las direcciones de buzamiento y magnitudes de buzamiento predominantes que presentan los tres sets de discontinuidades son:



- Set 1 = 205 / 88.
- Set 2 = 128 / 52.
- Set 3 = 260 / 64.

Figura 32. Estereograma de densidad de polos con la identificación de las tres familias principales (sets), para el macizo rocoso que contendrá el Túnel 3.





6.7. MODELADO GEOMECÁNICO DE INTERPOLACIÓN EN RECMIN 4.86

El método de explotación seleccionado para el presente yacimiento mineral (La Mascota y El Gigante), se denomina Sublevel Stopping. Este método es una variación del método Open stoping de sostenimiento natural, con cámaras de gran tamaño y pilares, que se van modelando más lentamente y sólo cuando aquellas terminan de arrancarse. Las cámaras vacías sólo pueden emplearse en minerales o rocas resistentes y firmes, con hastiales roca igualmente resistente. El mineral es volado y el hueco queda sin sostenimiento. El método de Arranque desde niveles o Sublevel stoping, normalmente se emplea sólo en mineralizaciones muy regulares, en los que el mineral y la roca de los hastiales son resistentes. El método se caracteriza por su gran productividad debido a que las labores de preparación se realizan en mayor parte dentro del mineral. Se prefieren las mineralizaciones en estructuras con altos valores de buzamiento, en los que el mineral puede caer por gravedad en el hueco abierto (Ramírez *et al.* 1.991).

De acuerdo con el método de explotación, se eligió el software minero Recmin, por: presentar un fácil de manejo dado por su interfaz gráfica y que estar en idioma español, para trabajar el modelado de bloques y galerías mineras en tres dimensiones, además porque el software minero comercial posee costos de adquisición de licencias y entrenamientos muy altos, fuera del alcance de estudiantes, consultores entre otros. RecMin (Recursos Mineros) es un paquete completo de programas, la mayoría freeware, diseñados para gestionar proyectos de investigación y exploración de recursos minerales. Diseñado y programado por doctor Cesar Castañón Fernández, siendo el fruto de 20 años de trabajo con empresas de investigación y exploración de recursos minerales, junto con el importante aporte de muchos Geólogos e Ingenieros.



El software es una potente herramienta que permite estimar y evaluar el potencial de recurso mineral para un yacimiento dado y visualiza gráficamente en tres dimensiones la campaña de exploración, ejecutando cálculos complejos como la interpolación de leyes y propiedades geomecánicas por el método del inverso de la distancia por medio de modelos de bloques, que representan el yacimiento mineral, para posteriormente diseñar la explotación de dicho yacimiento (tajo abierto o métodos subterráneos).

Con la base de datos de las descripciones geotécnicas de testigos suministrada, se realizaron modelos geomecánicos por interpolación. Los pozos utilizados comprenden desde el LB001 hasta el LB 559 (datos suministrados por Modelado, AUX Colombia SAS). Tener muy presente que la empresa cambio su metodología de logueo geotécnico a partir del pozo 444 tres veces, tema que será debatido por ser de suma importancia en el capítulo 7 de Análisis de Resultados.

Como primera medida se seleccionaron 183 pozos de los 559 iniciales, por estos pozos que atraviesan el macizo rocoso de interés a modelar (MR), siendo esto el objetivo principal de la presente investigación. Teniendo los pozos seleccionados, fue realizada una sensibilización de los datos de entrada al software minero, verificando los rangos de los parámetros y de la clasificación geomecánica para evitar errores durante la siguiente fase. Y finalmente, se importan los datos al software minero RecMin versión 4.86 para realizar la interpolación de los datos numéricos de los parámetros y clasificación geomecánica, generando modelos de bloques interpolando por el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW). Las verificaciones, análisis y discusión sobre los modelos generados serán abordados en el capítulo número 7. Se decidió que los datos a modelar fueran tres parámetros geomecánicos: recuperación, RQD y Ja; junto con los valores de la clasificación de Q de Barton, generando modelos de bloques generales (10 x 10 x 10m) y modelos detallados de (2 x 2 x 2m), uno para cada túnel de acceso minero.



En la figura 33, se ilustran los 183 pozos con los cuales se realiza la interpolación, la topografía y los túneles de acceso minero, en la interfaz gráfica 3D del software RecMin. En esta investigación solo se analizaron los túneles de acceso 1 y 3 (niveles 2640 y 2700, respectivamente), pero el método de explotación sublevel stoping contempla también rampas, galerías de producción, galerías de extracción y estocadas de beneficio, que no fueron consideradas por estar fuera de los alcances de la investigación, aunque modelos geomecánicos futuros de mayor extensión podrían considerarlas. En la tabla 23 se encuentran los códigos de los 183 pozos utilizados en el modelado del macizo rocoso.

La interpolación con el método IDW se realizó con los siguientes parámetros:

- Inverso de la distancia elevada a la tercera potencia (3).
- Distancia máxima de interpolación de 100 m, se tomó esta distancia debido que los pozos en profundidad se alejan mucho uno de los otros.
- Orientación promedio de las estructuras principales del macizo: dirección de buzamiento 330° , ángulo de buzamiento 70° y ángulo de cabeceo 0 .
- Datos del elipsoide de búsqueda para interpolar: factor en el eje primario 1, factor en el eje secundario 1 y factor en el eje terciario 2. Esto es necesario definirlo por encontrarnos modelando en el espacio tridimensional.
- El cálculo geomecánico es realizado con la formula (3) vista en el marco teórico: $(1/\text{distancia})^{\text{potencia}}$.
- Mientras, para el cálculo de interpolación de los datos litológicos, se utilizó otro método mucho más simple, conocido con el nombre de Cálculo por la muestra más cercana.



Figura 33. Vista 3D en el software RecMin, donde se observan los túneles de acceso y las perforaciones utilizadas en los modelos.

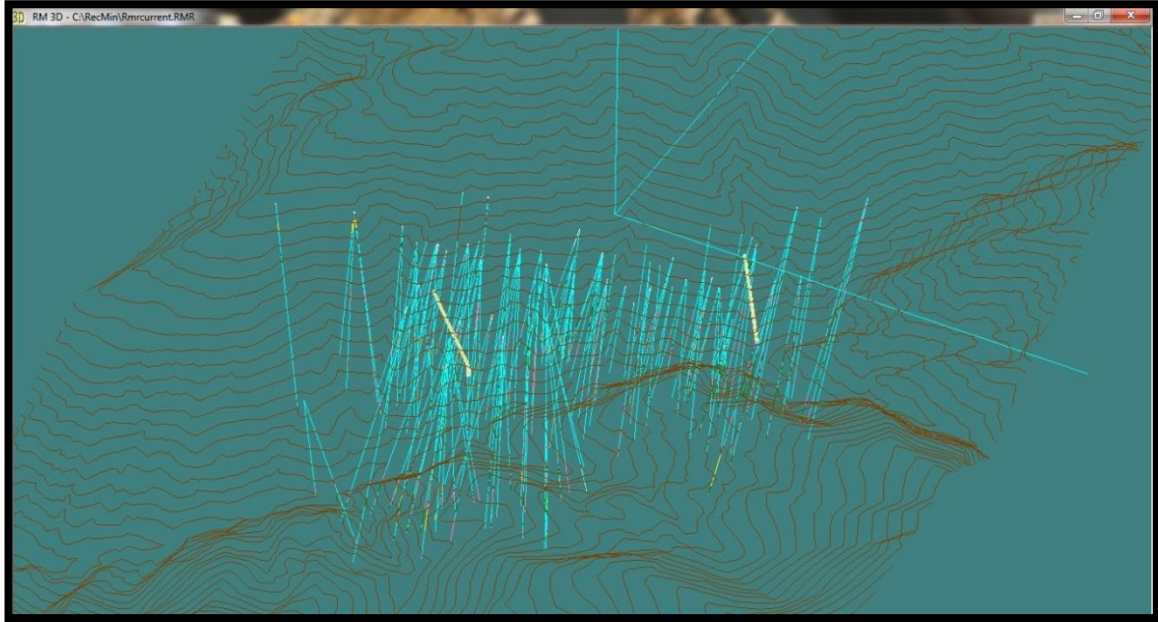


Tabla 23. Códigos de los pozos utilizados para realizar los modelos de interpolación geomecánica. Los dos pozos marcados se utilizaron en la correlación de geología y geotecnia.

CODIGOS DE LOS POZOS UTILIZADOS PARA REALIZAR LOS MODELOS DE INTERPOLACIÓN								
LB164	LB190	LB226	LB268	LB308	LB342	LB390	LB471	LB523
LB165	LB192	LB227	LB270	LB309	LB343	LB394	LB472	LB525
LB167	LB193	LB233	LB271	LB312	LB345	LB395	LB475	LB528
LB168	LB194	LB235	LB274	LB313	LB346	LB398	LB479	LB529
LB169	LB195	LB239	LB277	LB314	LB349	LB401	LB480	LB531
LB170	LB196	LB240	LB278	LB316	LB350	LB402	LB484	LB535
LB171	LB199	LB241	LB279	LB317	LB351	LB408	LB487	LB536
LB172	LB200	LB244	LB280	LB318	LB352	LB409	LB488	LB539
LB173	LB201	LB245	LB291	LB321	LB356	LB416	LB494	LB541
LB174	LB202	LB246	LB292	LB324	LB357	LB418	LB496	LB543
LB175	LB205	LB248	LB293	LB325	LB360	LB422	LB501	LB546
LB176	LB206	LB249	LB295	LB326	LB362	LB426	LB503	LB547
LB178	LB208	LB252	LB296	LB328	LB366	LB428	LB506	LB548
LB179	LB209	LB254	LB297	LB329	LB367	LB435	LB508	LB549
LB180	LB211	LB256	LB300	LB331	LB369	LB441	LB510	LB552
LB181	LB212	LB260	LB301	LB333	LB372	LB454	LB512	LB553
LB182	LB213	LB261	LB303	LB334	LB374	LB459	LB514	LB554
LB183	LB216	LB262	LB304	LB336	LB375	LB463	LB517	LB555
LB184	LB218	LB263	LB305	LB338	LB378	LB465	LB521	LB558
LB186	LB220	LB264	LB307	LB340	LB384	LB470	LB522	LB559
LB189	LB221	LB266						

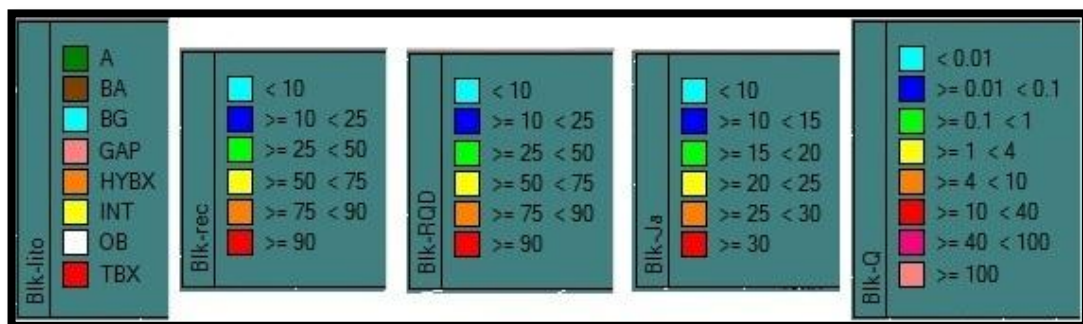


6.7.1. Modelado Geomecánico por interpolación geométrica general de macizo rocoso (MR)

Se generaron en total 15 modelos de bloques, los cinco primeros consideran todas las perforaciones e involucra todo el macizo rocoso (MR) que contendrá todas las excavaciones subterráneas para la futura extracción del mineral (brechas HYBX y TBX), mientras los otros diez modelos son: cinco específicos para el túnel de acceso 1 y cinco específicos para el túnel de acceso 3, abordados en los dos apartados siguientes. Todas las figuras de los 15 modelos de bloques generados en RecMin de los parámetros y clasificación geomecánica estudiados, se encuentran consignados en el anexo 5, para una visualización de mayor detalle.

En la figura 34, se muestran las leyendas utilizadas para cada parámetro y la clasificación geomecánica del Q de Barton, en cada uno de los modelos de bloques generados. Se utilizaron los rangos establecidos en el marco teórico y escalas de colores adecuadas para una mejor visualización e interpretación.

Figura 34. Leyendas de litologías y rangos utilizados en los modelos generados.



La figura 35 integra las imágenes en perspectiva de los modelos de bloques generados en el software minero RecMin 4.86, a partir de todas las perforaciones importadas (183). Todos los modelos de bloques generales del macizo rocoso (MR), tienen un tamaño de bloque de 1.000 m^3 ($10 \times 10 \times 10$), en total se generó un



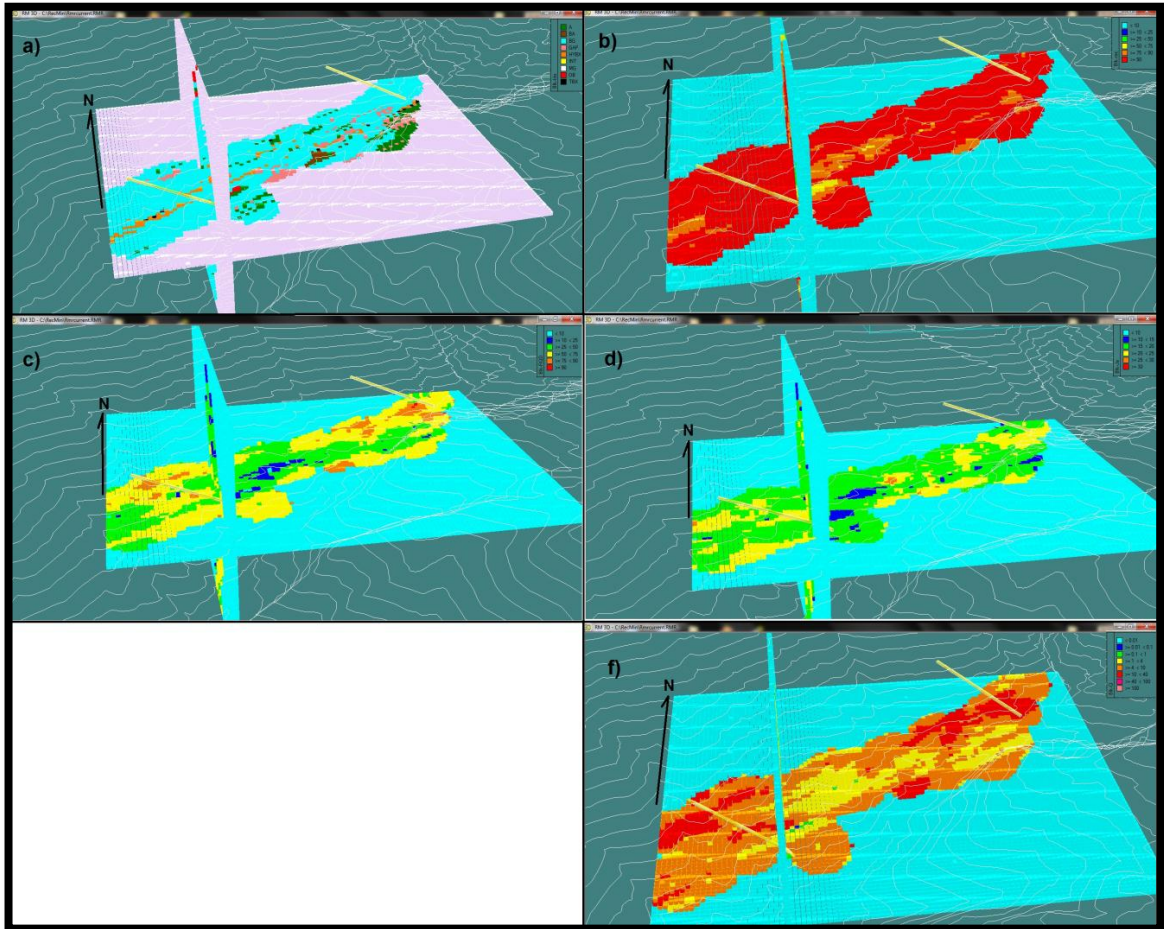
paralelepípedo rectangular con 30720 bloques de tamaño 1.000 m^3 , con origen de coordenadas: $1'307.500 \text{ m.N}$, $1'129.250 \text{ m.E}$. y 2.300 msnm . En las cinco imágenes integradas se muestran dos cortes del paralelepípedo (por motivos de visualización), uno horizontal perteneciente al nivel 2.640 y un corte vertical norte-sur con coordenada este $1'129.500 \text{ m.E}$. Las curvas de color blanco corresponden con la topografía suministrada por AUX Colombia. Las zonas blancas y de color azul cian hacia la periferia, muestran las zonas donde no se interpoló (sin datos).

Como una nota importante estos modelos generales no se recomiendan para tomar decisiones sobre las galerías de acceso, producción o transporte, porque el tamaño del bloque modelo es muy grande y no refleja información real detallada del macizo rocoso, esta información es solo para tener una visión general de macizo rocoso (MR).

En la figura 35 (a), se muestra la distribución de las litologías generada con la interpolación de datos de logging geológico, indicando en color naranja el trazo aproximado de la brecha mineralizada de La Mascota, el color azul cian corresponde con la litología de Neis Bandeado Indiferenciado (BG) que es la principal variedad de la roca caja (Neis de Bucaramanga), en colores marrón y rosado se muestran algunas bandas o zonas de neises biotíticos augen y neises cuarzo-feldespáticos, respectivamente y en las zonas de los emboquilles para los dos accesos el modelo muestra bandas de anfibolitas. La brecha de La Mascota según los resultados de este modelo, posee un espesor mayor en el Bloque T1 que en su contra parte Bloque T3 y de acuerdo con las direcciones de los ejes definidas por la empresa, la brecha mineralizada intersecta el túnel 1 aproximadamente a unos 150 m desde su emboquille (mitad del trazado), mientras la zona mineralizada atraviesa el túnel 3 aproximadamente a unos 45 m .



Figura 35. Modelos de bloques generales de la calidad del macizo rocoso, según los parámetros y la clasificación geomecánica del Q de Barton ($10 \times 10 \times 10$ m) para todo el volumen de macizo rocoso del presente estudio (MR). (a) Geología, (b) Recuperación, (c) RQD, (d) Condiciones de las discontinuidades – Ja, (f) Q de Barton.



En la figura 35 (b), se muestra la distribución del parámetro geomecánico de la recuperación de testigo, en términos generales MR posee una recuperación excelente ($rec > 90\%$, color rojo), aunque en algunos casos puntuales la recuperación puede caer al rango de buena y media recuperación (colores naranjas y amarillos). Pero la recuperación nunca es menor al 50%, esto se debe a que AUX le exige a sus empresas contratistas de perforación que la recuperación en estéril sea mayor del 60% y en mineral mayor del 70%, para poder realizar una labor más eficiente durante la etapa de logeo y modelado



geológico. La recuperación indica donde existen zonas de calidad de macizo más bajas, pero su resolución no es muy buena como se observa en la figura, es mejor utilizar el RQD o las clasificaciones geomecánicas.

En la figura 35 (c), se muestra la distribución del parámetro geomecánico del Rock Quality Designation (RQD), este parámetro en igual medida con lo observado en campo y los datos de correlación, es muy variable y aleatorio, e indica el grado de fracturación y junto con el J_n representan el tamaño de los bloques. Del modelo de bloques general para el MR, se define que los rangos de variación del RQD más importantes son: primero un RQD malo (25-50%, color verde) y segundo un RQD aceptable o medio (50-75%, color amarillo); los dos rangos anteriores son los grados de fracturación que presenta MR en más de un 80% de su volumen. Aunque se presenta una zona especialmente muy mala (color azul) en el espacio entre los dos túneles, específicamente la zona del macizo MR por debajo de la quebrada Colorados, estas áreas son de especial interés por ser zonas de mayor riesgo geotécnico.

En la figura 35 (d), se ilustran las variaciones espaciales del parámetro geomecánico de la Condición de las discontinuidades del RMR (equivalente al índice J_r/J_a de la clasificación Q de Barton), del modelo general se puede observar que mayoritariamente las condiciones de las discontinuidades se mantienen en el rango entre 15 y 20 puntos (colores verdes y amarillo), es decir, con valores buenos para este parámetro. Aunque se presenta una zona especialmente mala (color azul) en el espacio entre los dos túneles, específicamente la zona del macizo MR por debajo de la quebrada Colorados, estas áreas son de especial interés por ser zonas de mayor riesgo geotécnico.

En la figura 35 (f), se identifican las variaciones espaciales de la calidad del MR según la clasificación geomecánica del Q de Barton, en este modelo general se

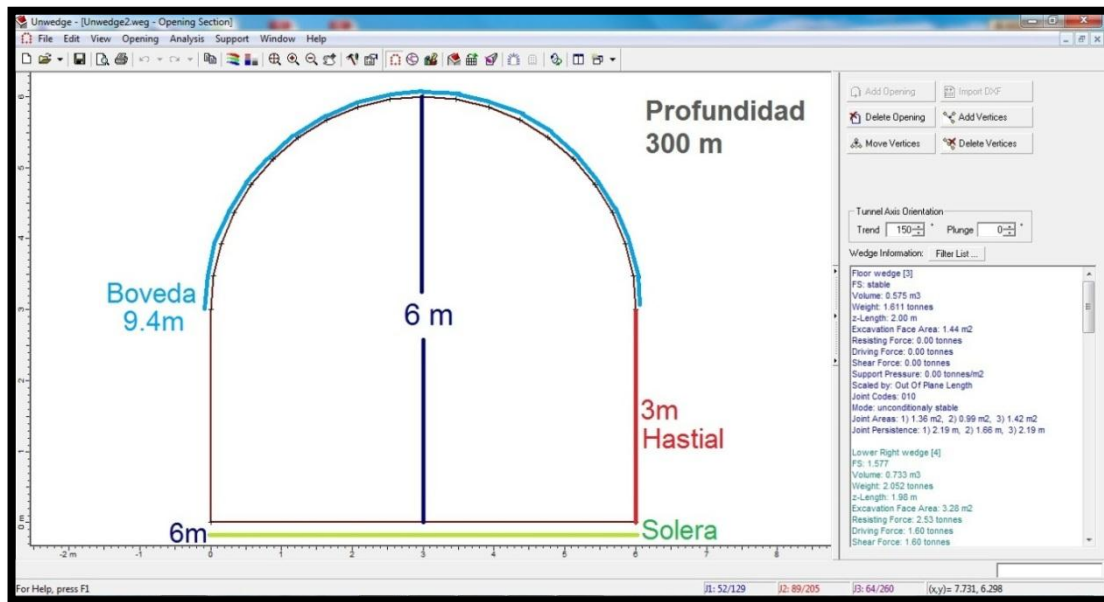


identificaron tres zonas de calidad diferente: primero los volúmenes de MR con calidad buena (color rojo), que se concentran en las zonas profundas del macizo pero cerca de los trazos finales de los accesos; después tenemos los volúmenes de MR con calidad mala (color amarillo), que se localizan cerca de las entradas de los túneles 1-3 y también en la zona mencionada antes del macizo MR por debajo de la quebrada Colorados; y finalmente la calidad media del MR es la más importante, porque es la calidad de mayor volumen y corresponde casi exclusivamente con la roca caja del neis de Bucaramanga poco a nada alterada.

6.7.2. Modelado Geomecánico específico por interpolación geométrica del bloque de macizo rocoso para el túnel de acceso 1 (T1)

El túnel de acceso número 1, posee un azimut inicial de 150° pero 10 m después el eje del túnel desvía hasta los 45 m de avance, a partir de ahí el azimut se mantiene en 130° . Este túnel está diseñado para profundizar 300 m en el macizo rocoso y actualmente se encuentra durante su fase constructiva pero por motivos de licenciamiento se encuentra detenido en 148 m de profundidad. Este acceso empieza en el nivel 2640 con -1° de inclinación y coordenadas de emboquille: 1'307.660 m.N y 1'129.526 m.E. Respecto a la sección planteada por parte de la empresa para los túneles de acceso del proyecto, presenta la geometría llamada de medio punto, con las dimensiones indicadas en la figura 36 (interfaz gráfica inicial del programa Unwegde): solera de 6 m, hastiales de 3 m, altura total de 6 m y bóveda de 9.4 m.

Figura 36. Sección tipo de medio punto de los túneles exploratorios N° 1 y 3 de la empresa AUX Colombia, sección portal 6 x 6 m.



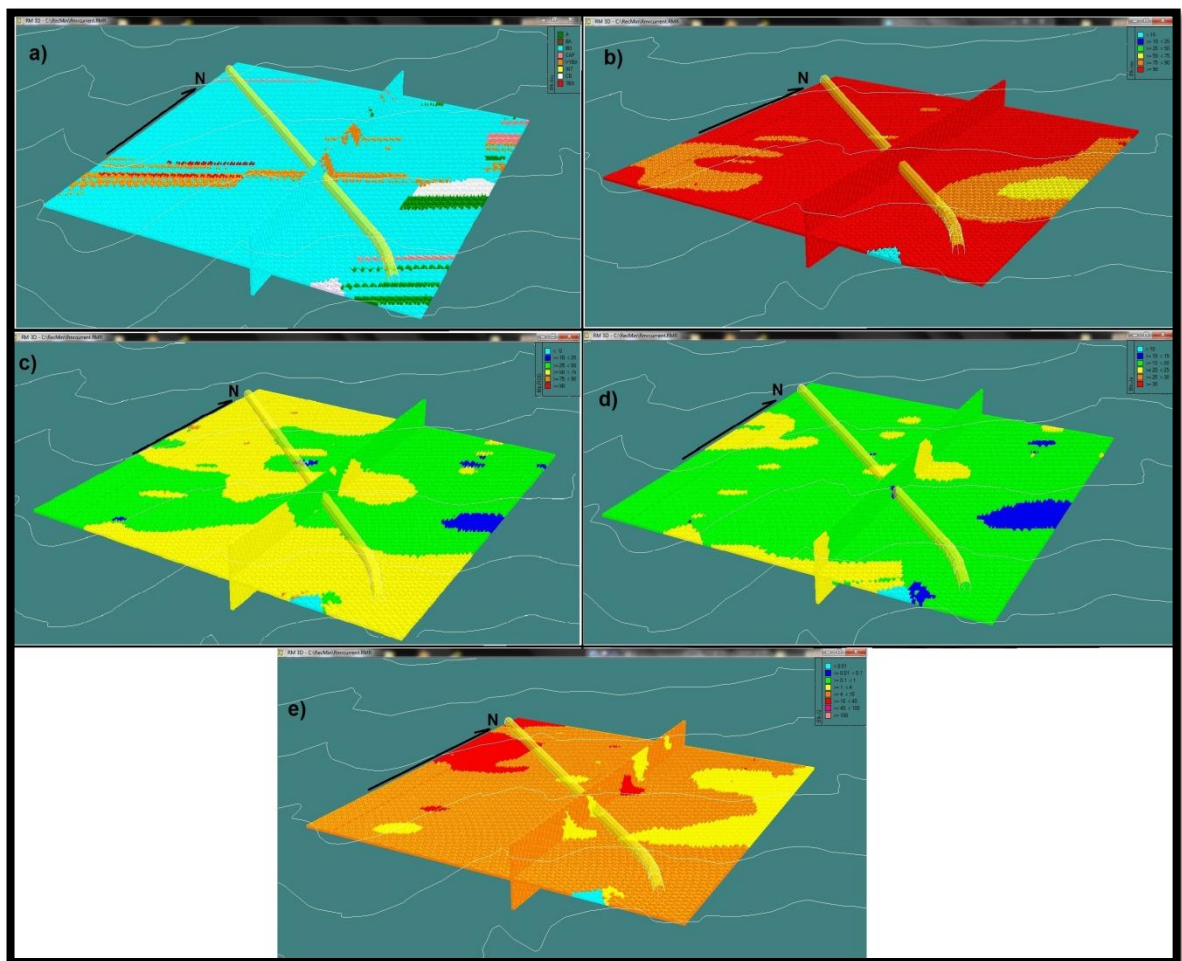
Como nota importante, los modelos geomecánicos específicos de ambos bloques estructurales (T1 y T3), si son recomendados para tomar decisiones durante las fases de diseño y construcción de las galerías de acceso y otras, debido que la resolución de estos modelos es muy buena y detalla, indicando claramente las variaciones espaciales de las propiedades y la calidad del macizo rocoso, para cada bloque estructural individual. Lo más importante de estos modelos es que indican posibles variaciones del macizo rocoso en profundidad, donde las observaciones de superficie son muy poco relevantes, permitiendo anticiparse de manera aproximada a los cambios en la calidad del macizo y tomar decisiones.

La figura 37 integra las imágenes en perspectiva de los modelos de bloques generados en el software minero RecMin 4.86, para el bloque estructural T1. Se produjeron 5 modelos de bloques específicos para el bloque estructural T1, tienen un tamaño de bloque de 8 m^3 ($2 \times 2 \times 2$), en total se generó un paralelepípedo rectangular con 84.000 bloques de tamaño 8 m^3 , con origen de coordenadas: 1'307.640 m.N, 1'129.300 m.E. y 2.620 msnm. En las cinco imágenes integradas se muestran dos cortes del paralelepípedo (por motivos de visualización), uno



horizontal perteneciente al nivel 2.640 y un corte vertical norte-sur con coordenada este 1'129.450 m.E. Las curvas de color blanco corresponden con la topografía suministrada por AUX Colombia.

Figura 37. Modelos de bloques generales de la calidad del macizo rocoso, según los parámetros y la clasificación geomecánica del Q de Barton ($2 \times 2 \times 2$ m) para el volumen de macizo rocoso que contendrá el Túnel 1 (T1). (a) Geología, (b) Recuperación, (c) RQD, (d) Condiciones de las discontinuidades – Ja, (e) Q de Barton.



En la figura 37 (a), se muestra la distribución de las litologías generada con la interpolación de los datos de logging geológico, indicando en color naranja el trazo



aproximado de la brecha mineralizada de La Mascota y en color azul cian corresponde con la litología de Neis Bandeado Indiferenciado (BG) que es la principal variedad de la roca caja (Neis de Bucaramanga), en color rosado se muestran algunas bandas o zonas de neises cuarzo-feldespáticos, y en la zona del emboquille se muestran bandas de anfibolitas. La brecha de La Mascota según los resultados de este modelo, posee un espesor de 10 m e intersecta al túnel 1 aproximadamente a unos 120 m desde su emboquille, mientras en los primeros metros de avance corta bandas de anfibolitas intercaladas con neises bandeados indiferenciados y neises cuarzo-feldespáticos (información confirmada durante la fase constructiva), y para el resto del trazado del túnel la roca atravesada es el neis bandeado indiferenciado (BG – roca caja).

En la figura 37 (b), se muestra la distribución del parámetro geomecánico de la recuperación de testigo, en términos generales T1 posee una recuperación excelente ($rec > 90\%$, color rojo), aunque en dos zonas importantes la recuperación decae al rango de buena y media recuperación (colores naranjas y amarillos). Pero la recuperación nunca es menor al 50%. La recuperación indica donde existen zonas de calidad de macizo más bajas, pero su resolución no es muy buena como se observa en la figura, es mejor utilizar el RQD o las clasificaciones geomecánicas.

En la figura 37 (c), se muestra la distribución del parámetro geomecánico del Rock Quality Designation (RQD) en el bloque T1. Del modelo de bloques específico se determina que inmediatamente después de atravesar el suelo y la roca madre meteorizada, el RQD se mantiene en el rango de calidad media (50 – 75%, color amarillo), hasta los 67 m de profundidad, donde el túnel cortara un volumen de macizo rocoso con RQD en el rango de calidad mala (25 – 50%, color verde), después en 130 m de profundidad el RQD entra en el rango de calidad media por 33 m más de avance, luego en los siguientes 30 m el RQD cae a calidad mala y



muy mala (zona puntual de color azul), y finalmente en los últimos 107 m planeados de túnel el RQD esperado se encuentra en calidad media.

En la figura 37 (d), se ilustran las variaciones espaciales del parámetro geomecánico de la Condición de las discontinuidades del RMR (equivalente al índice Jr/Ja de la clasificación Q de Barton) para el bloque T1. Del modelo de bloques específico se determina que la condición de las discontinuidades no se presenta grandes variaciones, se mantiene generalmente en 15 puntos (casi la totalidad del modelo, color verde), pero entre las profundidades de 145 – 160 m este parámetro mejora ascendiendo a 20 puntos (color amarillo). En este modelo aparecen otras zonas aisladas de 20 puntos y unas de 10 puntos (color azul) al este del túnel 1.

En la figura 35 (e), se identifican las variaciones espaciales de la calidad del macizo rocoso del bloque T1, según la clasificación geomecánica del Q de Barton. Del modelo de bloques específico se determina que inmediatamente después de atravesar el suelo y la roca madre meteorizada, los valores de Q se mantiene en el rango de calidad media (4 – 10, color naranja), con excepción de cuatro tramos del túnel donde la calidad varía, son los siguientes: entre los 68 - 76 m, 105 – 118 m y 167 – 182 m de profundidad, la calidad desciende al rango de calidad mala (1 – 4, color amarillo); y en los 230 - 270 m de avance del túnel se espera una calidad mejor, en el rango de calidad buena de Q (10 – 40, color rojo). La zona de suelo y roca madre es mejor definirla en campo por medio de cortes y no definir esos basándose en este tipo de modelos de interpolación. La clasificación geomecánica del Q, es una de las más utilizadas para cuantificar la calidad de macizos rocosos, en los que se construirán excavaciones subterráneas. Debido que los autores de esta clasificación, definieron los tipos de sostenimientos a utilizar para cada intervalo de calidad del macizo, basándose en todos los casos de túneles estudiados por ellos. Como los rangos definidos para los tres modelos de Q (para



MR, T1 y T3), son básicamente tres casos o rangos principales de calidad (mala, media y buena), en el apartado 3.7.4. se definirán los sostenimientos sugeridos por la clasificación geomecánica y en el capítulo siguiente se debatirá su aplicabilidad.

6.7.3. Modelado Geomecánico específico por interpolación geométrica del bloque de macizo rocoso para el túnel de acceso 3 (T3)

El túnel de acceso número 3, está planeado para tener 300 m de profundidad y un azimut de 330° para todo su trazado. Este túnel aun no inicia su fase constructiva, solo está planteado junto con otros 3 accesos (túneles 2, 4 y 5). Este acceso inicia en el nivel 2700 con -1° de inclinación y coordenadas de emboquille: 1'308.009m.N y 1'130.068m.E. Con relación a la sección planteada por parte de la empresa para los túneles de acceso del proyecto, presenta la geometría llamada de medio punto, con las dimensiones indicadas en la figura 36 (interfaz gráfica inicial del programa Unwegde): solera de 6 m, hastiales de 3 m, altura total de 6 m y bóveda de 9.4 m.

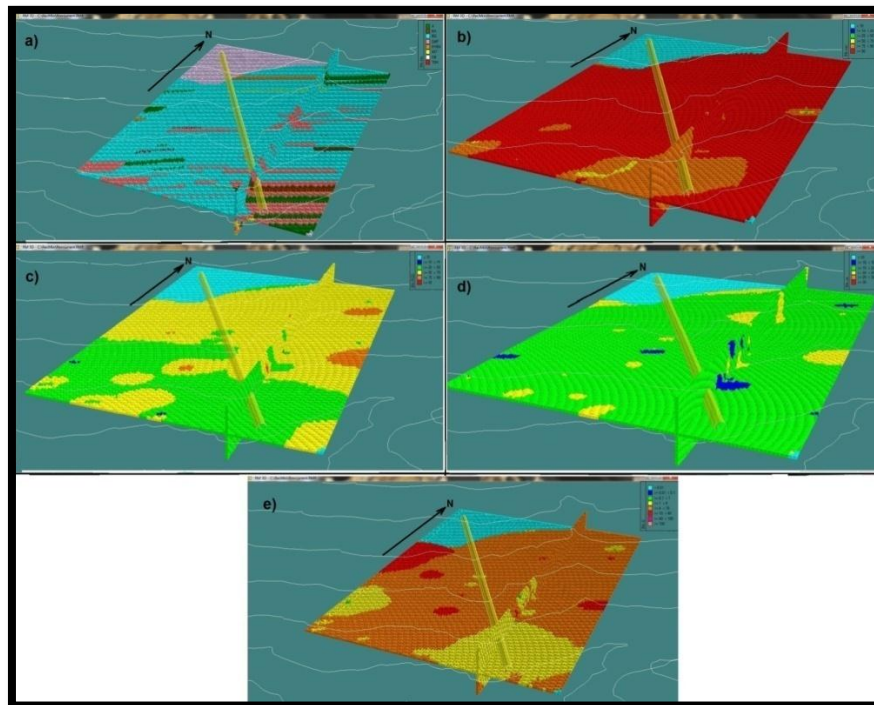
La figura 38 integra las imágenes en perspectiva de los modelos de bloques generados en el software minero RecMin 4.86, para el bloque estructural T3. Los 5 modelos de bloques específicos generados del bloque de macizo rocoso T1, tienen un tamaño de bloque de 8 m³ (2*2*2), en total se generó un paralelepípedo rectangular con 70.000 bloques de tamaño 8 m³, con origen de coordenadas: 1'308.000m.N, 1'129.900m.E. y 2.680 msnm. En las cinco imágenes integradas se muestran dos cortes del paralelepípedo (por motivos de visualización), uno horizontal perteneciente al nivel 2.700 y un corte vertical norte-sur con coordenada este 1'130.050 m.E. Las curvas de color blanco corresponden con la topografía.

En la figura 38 (a), se muestra la distribución de las litologías generadas con la interpolación de los datos de logging geológico. En color rosado se muestran algunas bandas o zonas de neises cuarzo-feldespáticos junto con bandas de



anfibolitas de color verde se localizan en la zona del emboquille del túnel 3 los primeros 65 m de trazado, acompañando la brecha mineralizada. La brecha de La Mascota según los resultados de este modelo, posee un espesor de máximo 4 m e intersecta al túnel 3 aproximadamente a unos 28 m desde su emboquille, para el resto del trazado del túnel la roca atravesada es el neis bandeado indiferenciado (BG – roca caja). Para los últimos 60 m de túnel, no se tiene resultados como consecuencia de encontrarse fuera del rango de interpolación, pero se alcanzó a definir otro tramo de mineralización estimado a 238 m de profundidad desde el emboquille y con un espesor aproximado de 5 – 6 m.

Figura 38. Modelos de bloques generales de la calidad del macizo rocoso, según los parámetros y la clasificación geomecánica del Q de Barton ($2 \times 2 \times 2$ m) para el volumen de macizo rocoso que contendrá el Túnel 3 (T3). (a) Geología, (b) Recuperación, (c) RQD, (d) Condiciones de las discontinuidades – Ja, (e) Q de Barton.



En la figura 38 (b), se muestra la distribución del parámetro geomecánico de la recuperación de testigo. Después de pasar el suelo y la roca madre (un espesor máximo esperado de 8 – 10 m, según las observaciones de campo), se entrará en



el macizo con rango de recuperación buena (rec 90 – 75%, color naranja) hasta el avance de 60 m, para finalmente el resto del trazado mantenerse en recuperación excelente (rec > 90%, color rojo). Como una observación importante, donde la litología es diferente del neis bandeado indiferenciado (BG), la recuperación es menor como se observa en la figura 38, también es comparable con el RQD y Q, como se verá a continuación.

En la figura 38 (c), se muestra la distribución del parámetro geomecánico del Rock Quality Designation (RQD) dentro del bloque T3. Del modelo de bloques específico se puede definir, que inmediatamente después de atravesar el suelo y la roca madre meteorizada, el RQD se mantiene en el rango de calidad mala (25 – 50%, color verde), hasta los 70 m de profundidad; el túnel cortara volúmenes de macizo rocoso con RQD de calidad media (50 – 75%, color amarillo), entre los avances 70 – 105 m y 160 – 300 m de profundidad; con un tramo adicional entre 105 – 160 m, el cual posee una calidad nuevamente mala, esta zona puede tener alguna relación con unas bandas de neises cuarzo – feldespáticos como se observa en la figura 38. Cerca del túnel aparecen unas zonas puntuales de mejor calidad, RQD bueno (color naranja).

En la figura 38 (d), se ilustran las variaciones espaciales del parámetro geomecánico de la Condición de las discontinuidades del RMR (equivalente al índice Jr/Ja de la clasificación Q de Barton) para el bloque T3. Del modelo de bloques específico se determina que la condición de las discontinuidades presenta muy pocas variaciones, se mantiene generalmente en 15 puntos (casi la totalidad del modelo, color verde), pero en algunas zonas puntuales cercanas al túnel 3, este parámetro mejora ascendiendo a 20 puntos (color amarillo) y otras desciende a 10 puntos (color azul).



En la figura 38 (e), se identifican las variaciones espaciales de la calidad del macizo rocoso para el bloque T3, según la clasificación geomecánica del Q de Barton. Del modelo de bloques específico se puede definir que inmediatamente después de atravesar el suelo y la roca madre meteorizada, los valores de Q se mantiene en el rango de calidad mala (1 – 4, color amarillo), hasta la profundidad de 70 m; mientras los 230 m de túnel restantes se mantienen en el rango de calidad media (4 – 10, color naranja). En un tramo pequeño entre 150 – 162 la calidad del macizo decae al rango de mala.

6.7.4. Sostenimientos estimados a partir de los rangos de Q

El sostenimiento de una excavación subterránea puede ser estimado de forma empírica utilizando las clasificaciones geomecánicas, como en este caso el q de Barton. Sin embargo, se deben tener en cuenta ciertas limitaciones:

- No se cuantifica el factor de seguridad.
- Diferentes parámetros pueden dar lugar al mismo índice Q procedentes de casos que precisaron distintos sostenimientos.
- Es conveniente estudiar el sostenimiento del túnel en función de la idoneidad de la clasificación elegida.

La determinación de Q permite estimar el sostenimiento de los túneles. Para ello se procede en dos etapas:

- Se selecciona el grado de importancia de la excavación definido mediante un índice ESR (Excavation Support Ratio) que viene a ser un factor de seguridad. En efecto, Barton homogeniza los diámetros de las excavaciones a un diámetro “equivalente”, que se define como $D_e = D/ESR$.



Los valores de ESR aparecen en la tabla 24. Los túneles de acceso planteados corresponden con tipo de excavaciones de minas permanentes para grandes excavaciones (sombreado), por lo cual el valor de ESR es 1.6. Con el diámetro de los túnel es $D = 6$ m y el valor de ESR, el diámetro equivalente $De = 3.75$.

- Se elige el tipo de sostenimiento combinando el valor de clasificación de Q de Barton, el diámetro equivalente y los factores condicionantes (RQD/J_n , J_r/J_a y P); utilizando las categorías de sostenimiento indicadas en la tabla 25. El $RQD/J_n = 4.5$ y $J_r/J_a = 0.65$ (los datos utilizados son los promedios para cada parámetro tomados en campo).

Tabla 24. Valores orientativos de ESR en función del tipo de excavación.

TIPO DE EXCAVACIÓN	ESR	NÚMERO DE CASOS
A. Minas abiertas temporalmente, etc.	3 a 5	2
B. Pozos verticales: 1)Sección circular. 2)sección rectangular o cuadrada.	2.5 2.0	0
C. Minas abiertas permanentemente, túneles hidroeléctricos, túneles piloto y galerías de avance para grandes excavaciones.	1.6	83
D. Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles pequeños de carretera y ferrocarril, túneles de acceso.	1.3	25
E. Centrales eléctricas subterráneas , túneles grandes de carretera y ferrocarril, cavernas de defensa civil, emboquilles e intersecciones.	1.0	73
F. Centales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, pabellones deportivos y de servicios, etc.	0.8	2

Consecuentemente con los resultados obtenidos con los modelos geomecánicos de interpolación, los dos principales rangos de variación de Q son: calidad mala y media. Por lo tanto los dos sostenimientos considerados para estos dos rangos de calidad se muestran en la tabla 25.



Para el rango de calidad media corresponde con la categoría de soporte 17, definida por el siguiente sostenimiento: pernado sistemático inyectado sin tensión, con pernos helicoidales de 2 m de largo y espaciado de 1.5 m, y shotcrete de 3 cm de espesor con fibras de polímero. Mientras para el rango de calidad mala corresponde con la categoría de soporte 21, definida por el siguiente sostenimiento: pernado sistemático inyectado sin tensión, con pernos helicoidales de 2 m de largo y espaciado de 1 m, y shotcrete de 5 cm de espesor con fibras de polímero.

Tabla 25. Sostenimientos definidos según el sistema de clasificación geomecánica del Q de Barton, entre los rangos de 1 y 10.

Para Q entre 10 y 1								
CATEGORÍA SOPORTE	Q	FACTORES CONDICIONANTES				D _r (m)	TIPO DE SOPORTE	OBSERVACIONES
		RQD J _v	J _v	D _r (m)	P (kg/cm ²)			
17	10-4	> 30	—	—	1,0	3,5-9	sb (alg)	I
≥ 10, ≤ 30		B (alg) 1-1,5 m						
< 10		B (alg) 1-1,5 m + S 2-3 cm S 2-3 cm						
> 5		B (hg) 1-1,5 m + cmf B (alg) 1-1,5 m + cmf						
18	10-4	> 10	—	—	1,0	7-15	B (hg) 1-1,5 m + S 2-3 cm B (alg) 1-1,5 m + S 2-3 cm	I, III
≤ 5		B (alg) 1-1,5 m + S 2-3 cm					I	
19	10-4	> 20	—	—	1,0	12-29	B (hg) 1-2 m + S (nr) 10-15 cm B (hg) 1-1,5 m + S (nr) 5-10 cm	I, II, IV
< 20		B (hg) 1-2 m + S (nr) 20-25 cm B (hg) 1-2 m + S (nr) 10-20 cm					I, II	
20* ver nota XII	10-4	> 35	—	—	1,0	24-52	B (hg) 1-2 m + S (nr) 20-25 cm B (hg) 1-2 m + S (nr) 10-20 cm	I, V, VI
	10-4	< 35	—	—	1,0	24-52	B (hg) 1-2 m + S (nr) 20-25 cm B (hg) 1-2 m + S (nr) 10-20 cm	I, II
21	4-1	> 12,5	—	—	1,5	2,1-6,5	B (alg) 1 m + S 2-3 cm S 2,5-5 cm B (alg) 1 m	I
< 12,5		B (alg) 1 m + cmf S 2,5-7,5 cm B (alg) 1 m + S (nr) 2,5-5 cm D (alg) 1 m					I	
12,5 > 0,75								
—								
22	4-1	> 10, ≤ 30	—	—	1,5	4,5-11,5	B (alg) 1 m + cmf S 2,5-7,5 cm B (alg) 1 m + S (nr) 2,5-5 cm D (alg) 1 m	I
< 10, > 30								
23	4-1	> 15	—	—	1,5	8-24	B (hg) 1-1,5 m + S (nr) 10-15 cm B (alg) 1-1,5 m + S (nr) 5-10 m	I, II, IV, VII
24* ver nota XII	4-1	> 30	—	—	1,5	18-48	B (hg) 1-1,5 m + S (nr) 15-30 cm B (hg) 1-1,5 m + S (nr) 10-15 cm	I, V, VI
	4-1	< 30	—	—	1,5	18-48	B (hg) 1-1,5 m + S (nr) 15-30 cm B (hg) 1-1,5 m + S (nr) 10-15 cm	I, II, IV

6.8. MODELADO GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD CON UNWEDGE 3.0



En esta sección se modelan las posibles cuñas que se generarían durante la excavación de los dos túneles objeto del presente estudio en cada una de sus secciones. Para esto se utilizó el programa informático llamado UNWEDGE versión 3.0, el cual emplea como datos de entrada la orientación de las discontinuidades en el macizo rocoso y la orientación del eje del túnel para generar a través de la intersección de estos planos estructurales las posibles cuñas en la periferia de la excavación.

Unwedge es un software de la casa Rocscience Inc. Este potente programa realiza análisis de estabilidad y visualiza en tres dimensiones las excavaciones subterráneas en rocas duras que poseen discontinuidades intersectadas. Los factores de seguridad los calcula para cuñas potencialmente inestables y que requieran de sostenimientos diversos como: pernos y hormigón proyectado (shotcrete). Este software permite crear rápidamente un modelo, realizando análisis de factores de seguridad de las cuñas, refuerzo para cuñas inestables e interpretación de dichos resultados.

El software Unwedge presenta las siguientes limitaciones y salvedades: Este software se debe utilizar para el análisis de rotura en cuña alrededor de excavaciones subterráneas construidas en roca dura, donde las discontinuidades son persistentes y donde la falla del macizo rocoso inducida por los esfuerzos aún no se ha producido. El software supone que los deslizamientos de las cuñas tienen lugar en las discontinuidades y las cuñas formadas solo se mueven como cuerpos rígidos sin deformación o fracturamiento interno. Las cuñas en la realidad son tetraédricos, definidos por tres planos de discontinuidad que se intersectan. Este software analiza máximo tres planos estructurales al mismo tiempo. Si hay más de tres planos principales se identifican en el análisis estructural y a continuación todas las combinaciones de todos los planos deben considerarse. Todas las superficies de discontinuidad se suponen como perfectamente planas y



las cuñas pueden ocurrir en cualquier lugar del macizo rocoso excavado. La excavación subterránea se supone que tiene una sección transversal constante a lo largo de su eje y que las discontinuidades son persistentes.

Según la clasificación de los tipos de roca de Terzaghi, los túneles 1 y 3, se encuentran dentro un macizo rocoso moderadamente fisurado, a un macizo agrietado en bloques en menor medida; concordante con lo anterior y adicionalmente por encontrarse a niveles someros los mecanismos de inestabilidad en los túneles de acceso son principalmente: caída de bloques (cuñas) y movimiento entre paredes juntas. Pero no se presentan fluencia del material rocoso hacia la excavación y tampoco estallidos de rocas, porque la carga litostática aún no es lo suficientemente importante.

Los modelos de estabilidad de cuñas y los sostenimientos definidos por medio de esta metodología, son aplicables exclusivamente a los tramos de sección de túnel donde el macizo posee un comportamiento frágil y se forman las cuñas por la intersección de las familias de discontinuidades. Como nota importante para ambos accesos se modelaron las cuñas con y sin el peso adicional del agua subterránea, para finalmente en los dos casos aplicar el sostenimiento pertinente, de acuerdo con la aparición o no del agua.

6.8.1. Modelado de estabilidad para el túnel de acceso 1

El análisis de estabilidad de cuñas para el túnel de acceso 1, se realizó con los datos tomados en superficie y todos los datos tomados en subterráneo. De todas las 30 estaciones (D y S), donde se levantaron las líneas geotécnicas, se utilizó la información requerida de 14 estaciones para este modelo: D1, D2, D3, D14, D15, D17, D20, D22, D25, S1, S2, S3, S4 y S5; por encontrarse dentro del bloque T1.

En el apartado 6.6., se procesaron los datos estructurales correspondientes a estas 14 estaciones, para definir las familias principales de discontinuidades del



bloque estructural T1 (set 1: 71/194; set 2: 44/102; set 3: 67/299). Otro dato adicional importante mencionado en el apartado anterior, el tipo de sección para ambos accesos es denominado de Punto Medio y las dimensiones de las secciones son de 6 m como se especificó en la figura 36.

Para alimentar los modelos se necesita más información a parte de las familias de discontinuidades, la dirección y sección del túnel. En ambos modelos geotécnicos se utilizaron los siguientes datos, definidos con ayuda de los datos de campo:

- Factor de Seguridad de diseño: 1.5
- Densidad de la roca: 2.8 ton/m³
- Densidad del agua: 1 ton/m³
- Ondulación de las estructuras: 2°
- Modelo de esfuerzo de corte: Barton-Bandis
- JRC: 10
- JCS: 13209 ton/m²
- Phi r: 20°

En la figura 39, se ilustran las cuñas formadas por la intersección de los tres sets definidos con la ayuda del software Dips y la sección del túnel de acceso 1 en tres dimensiones, para 3 m de pase. Como ya se mencionó en apartado anterior en términos generales, este túnel está plateado para tener 300 m de longitud, iniciar en el nivel 2.640 y tener un azimut de 130° con 1° de inclinación. En la periferia se forman cinco cuñas junto con otra en el frente de avance (cuñas n° 1, 3, 4, 6, 8 y 9), está última no se mostró en la figura. En color azul transparente muestra la capa de Shotcrete definida como sostenimiento en este caso y en color verdoso se muestra la roca desnuda, se plantea la capa de concreto proyectado de esta forma para que en la base de los hastiales del túnel posteriormente se realice el muestreo de canal necesario para realizar cálculos de reservas.



En la tabla 24, se organizan los datos de los pesos y volúmenes para cada cuña formadas según el modelo del acceso 1, también se ubicaron los factores de seguridad de las cuñas potenciales para los cuatro casos planteados:

- sección con solo cuñas y sin agua;
- sección con solo cuñas y con agua;
- sección con cuñas, sin agua y con sostenimiento; y finalmente
- sección con cuñas, con agua y con sostenimiento.

Los factores de seguridad hallados para el primer caso son bastantes aceptables para las cuñas 3, 6 y 8 (FS superiores a 2), pero para las cuñas 4, 8 y 10 los FS se encuentran por debajo del límite de inestabilidad (FS inferiores a 1). En el segundo caso con el adicional del peso del agua los factores de seguridad para todas las cuñas formadas se hacen iguales a 0, dato concordante con lo observado en los primeros avances de túnel. Con los sostenimientos definidos a continuación para los dos casos los factores de seguridad aumentan considerablemente, en el tercer caso factores de seguridad superiores a 5 y en el cuarto caso factores de seguridad superiores a 3. Aunque como el sostenimiento es administrado solo en la periferia, para la cuña del frente en caso con agua es siempre inestable (FS=0).

El tipo de sostenimiento definido para los tramos del macizo rocoso donde el mecanismo de falla es principalmente caída de cuñas, es el siguiente:

- capa de 2 a 3 cm de Shotcrete en ambientes secos y de 4 a 5 cm en presencia de agua. Las propiedades del Shotcrete son: resistencia estimada de 40 ton/m^2 y un peso unitario de 2.4 ton/m^3 .
- De acuerdo con los resultados obtenidos los pernos de anclaje no son requeridos, pero hay que tener mucha precaución con estos resultados.
- Dependiendo de las condiciones del macizo y basándose en las observaciones in situ se puede colocar malla o pernos de anclaje, de acuerdo con las variaciones de la calidad del macizo rocoso.



Estos sostenimientos se definieron utilizando prueba y error, y tomando como resultado final el caso que mantenía los factores de seguridad de todas las cuñas superiores a 1.5.

Figura 39. Modelo geotécnico de formación de cuñas intersectadas con la sección del Túnel de acceso 1 y diseño de sostenimiento con factores de seguridad aceptables. Pase de 3 metros. Tipo de sección punto medio.

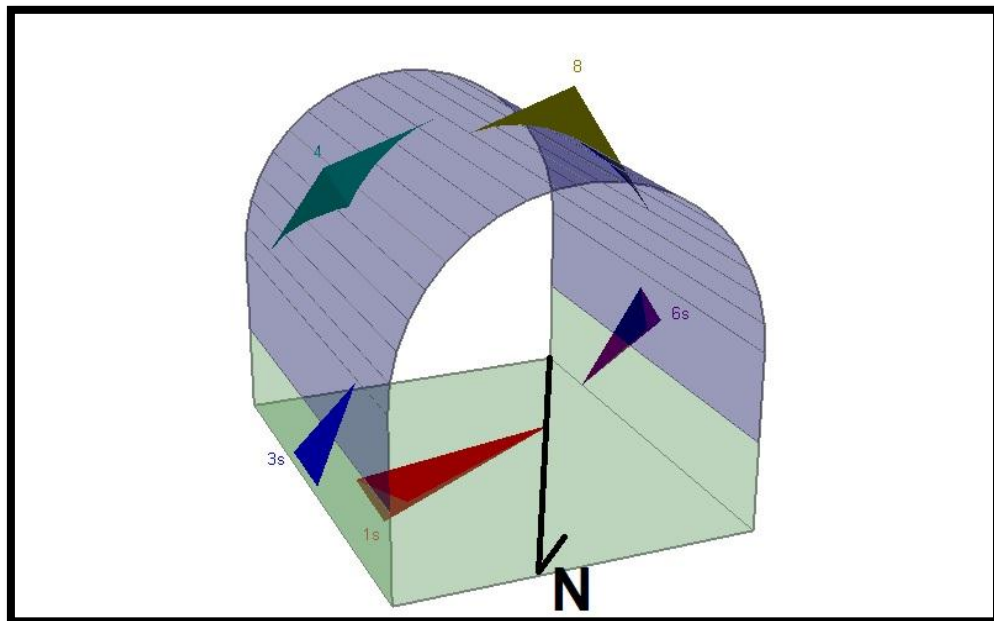


Tabla 26. Resumen de los datos de factor de seguridad para las 7 cuñas formadas entre los tres de discontinuidades y la sección del túnel 1, en los cuatro casos analizados.

CUÑA Nº	TIPO	FS SIN H2O	FS CON H2O	PESO (ton)	VOLUMEN (m3)	FS SIN AGUA - SIN SOSTEIM	FS CON AGUA - CON SOSTEIM
Wedge 1	Floor wedge	Estable	Estable	1.652	0.590	Estable	Estable
Wedge 3	Lower right wedge	2.117	0.000	0.336	0.120	24.797	3.949
Wedge 4	Lower left wedge	0.801	0.000	0.733	0.262	14.489	5.196
Wedge 6	Roof wedge	2.235	0.000	0.336	0.120	10.276	3.003
Wedge 8	Upper righth wedge	0	0.000	1.018	0.364	5.296	3.617
Wedge 9	Near end wedge	2.333	0.000	2.659	0.950	2.333	0.000
Wedge 10	Far end wedge	0.978	0.000	2.659	0.950	0.978	0.289



6.8.2. Modelado de estabilidad para el túnel de acceso 3

El análisis de estabilidad de cuñas para el túnel de acceso 3, se realizó solo con los datos tomados en superficie, debido a que no se tiene acceso autorizado a los predios donde localizan las galerías artesanales en cercanías a este túnel. De las 25 estaciones (deltas – D) donde se levantaron las líneas geotécnicas superficiales, se utilizaron éstas 16 estaciones para el modelo: D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D16, D18, D19, D21, D23, D24; por encontrarse dentro del bloque T3.

En el apartado 6.6., se procesaron los datos estructurales correspondientes a estas 16 estaciones, para definir las familias principales de discontinuidades del bloque estructural T3 (set 1: 89/205; set 2: 52/129; set 3: 54/260).

En la figura 40, se ilustran las cuñas formadas por la intersección de los tres set definidos con la ayuda del software Dips y la sección del túnel de acceso 3 en tres dimensiones, para 3 m de pase. Como ya se mencionó en apartado anterior, este túnel está plateado para tener 300 m de longitud, iniciar en el nivel 2.700 y tener un azimut de 150° con 1° de inclinación. En la periferia se forman cinco cuñas junto con otra en el frente de avance (cuñas nº 3, 4, 5, 6, 8 y 9), está última no se mostró en la figura. En color azul transparente muestra la capa de Shotcrete definida como sostenimiento en este caso y en color verdoso se muestra la roca desnuda, se plantea la capa de concreto proyectado de esta forma para que en la base de los hastiales del túnel posteriormente se realice el muestreo de canal necesario para realizar cálculos de reservas.

En la tabla 25, se organizan los datos de los pesos y volúmenes para cada cuña formadas según el modelo del acceso 3, también se ubicaron los factores de seguridad de las cuñas potenciales para los cuatro casos planteados:



- sección con solo cuñas y sin agua;
- sección con solo cuñas y con agua;
- sección con cuñas, sin agua y con sostenimiento; y finalmente
- sección con cuñas, con agua y con sostenimiento.

Los factores de seguridad hallados para el primer caso son bastantes aceptables para las cuñas 4, 9 y 10 (FS superiores a 1.5), pero para las cuñas 5, 6 y 8 los FS se encuentran por debajo del límite de inestabilidad (FS inferiores a 1). En el segundo caso con el adicional del peso del agua los factores de seguridad para casi todas las cuñas formadas se hacen iguales a 0, aunque las cuñas 4 y 10 FS es 0.2 también inestables. Con los sostenimientos definidos a continuación para los dos casos los factores de seguridad aumentan considerablemente, en el tercer caso factores de seguridad superiores a 25 y en el cuarto caso factores de seguridad superiores a 13. Aunque como el sostenimiento es administrado solo en la periferia, para la cuña del frente en caso con agua es siempre inestable (FS=0).

El tipo de sostenimiento definido para los tramos del macizo rocoso donde el mecanismo de falla es principalmente caída de cuñas, es el siguiente:

- capa de 2 a 3 cm de Shotcrete en ambientes secos y de 4 a 5 cm en presencia de agua. Las propiedades del Shotcrete son: resistencia estimada de 40 ton/m² y un peso unitario de 2.4 ton/m³.
- Pernos helicoidales sistemáticos en abanico espaciados cada 1.5 m, 3 m de longitud y para 2 m de off set de avance.

Estos sostenimientos se definieron utilizando prueba y error, y tomando como resultado final el caso que mantenía los factores de seguridad de todas las cuñas por encima de 1.5. Se diseñó el bulonado sistemático de 7 pernos en abanico debido a las cuñas formadas en los hastiales poseen pesos importantes y la sola



capa de Shotcrete como está diseñada no es un sostenimiento eficaz. Y la capa de Shotcrete asegura el sostenimiento de las cuñas de menor tamaño (Unwedge 8), que los pernos no logran asegurar. Pero como se combinan ambos sostenimientos los factores de seguridad dan bastante grandes (superiores a 5).

Figura 40. Modelo geotécnico de formación de cuñas intersectadas con la sección del Túnel de acceso 3 y diseño de sostenimiento con factores de seguridad aceptables. Pase de 3 metros. Tipo de sección punto medio.

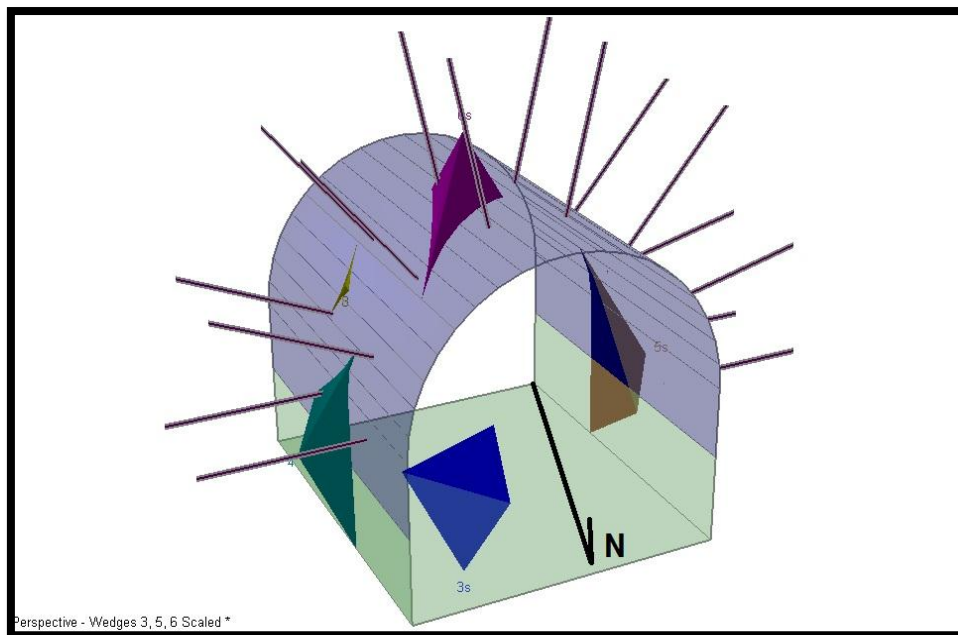


Tabla 27. Resumen de los datos de factor de seguridad para las 7 cuñas formadas entre los tres de discontinuidades y la sección del túnel 3, en los cuatro casos analizados.

CUÑA Nº	TIPO	FS SIN H2O	FS CON H2O	PESO (ton)	VOLUMEN (m3)	FS SIN AGUA - SIN SOSTEIM	FS CON AGUA - CON SOSTEIM
Wedge 3	Floor wedge	Estable	Estable	1.611	0.575	Estable	Estable
Wedge 4	Lower right wedge	1.838	0.210	2.052	0.733	35.833	17.873
Wedge 5	Lower left wedge	0.972	0.000	1.997	0.713	25.668	13.302
Wedge 6	Roof wedge	0.048	0.000	2.244	0.801	44.838	23.231
Wedge 8	Upper righth wedge	0.000	0.000	0.009	0.003	137.691	42.436
Wedge 9	Near end wedge	1.329	0.000	4.293	1.533	1.343	0.000
Wedge 10	Far end wedge	1.993	0.273	4.293	1.533	2.011	0.289



7. ANÁLISIS RESULTADOS

Inicialmente se tenía contemplado verificar los modelos geomecánicos de interpolación geométrica, utilizando las perforaciones posteriores al pozo LB 559, es decir, utilizando pozos nuevos; pero debido a cambios en la metodología de logeo geotécnico por parte de la empresa partir del pozo LB 444, no fue posible utilizar dichos de datos en la corroboración manual, ya que los valores del Q de Barton obtenidos con la anterior metodología sobreestiman en cierta medida el valor de final de la calidad del macizo rocoso.

En la tabla 28, se muestran las variaciones de los valores del Q de Barton en la perforación LB 525 en sus primeros 50 m de núcleo, debido que dicho pozo fue descrito con ambas metodologías (nueva y vieja), permitiendo observar las diferencias en los valores obtenidos para un mismo tramo de testigo. Como consecuencia de este inconveniente para verificar los modelos generados en el proyecto, se recurre a otras fuentes de información primaria para realizar el retro-análisis o “verificación”. Como por ejemplo en este caso los datos de campo de superficie y subterráneo junto con los datos tomados en el frente de avance del túnel de acceso, que se encuentra en fase constructiva. En el anexo 1 se encuentran en formato de Excel el formato en blanco de logging geotécnico y el formato con información completa para el pozo LB 525 totalmente descrito.

Con la construcción de los primeros 148 metros del túnel de acceso 1, los geólogos encargados del túnel tomaron datos de clasificación geomecánica Q de Barton para cada avance del túnel, en total 77 datos tomados entre el 10 de Julio y 8 de Octubre de 2012, fecha desde la cual el túnel se encuentra inactivo; y en conjunto con los datos de campo obtenidos en esta investigación, se logró retro-analizar utilizando el método de comparación directa, los resultados obtenidos in situ con los modelos geomecánicos de interpolación.



Tabla 28. Tabla de comparación de los valores de la clasificación Q de Barton con las metodologías nueva y antigua, en los primeros 50 m del pozo LB 525.

Depth		Clasificación	
From	To	Q Antiguo	Q Nuevo
0.00	1.52	xxx	xxx
1.52	3.05	xxx	xxx
3.05	4.57	xxx	xxx
4.57	6.09	xxx	xxx
6.09	7.62	xxx	xxx
7.62	9.14	xxx	xxx
9.14	10.66	xxx	xxx
10.66	12.19	xxx	xxx
12.19	13.71	xxx	xxx
13.71	15.24	xxx	xxx
15.24	16.76	0.295	0.22
16.76	18.28	0.329	0.22
18.28	19.20	0.459	0.22
19.20	19.50	0.459	0.22
19.50	20.11	0.459	0.22
20.11	20.72	0.459	0.22
20.72	21.33	0.411	0.22
21.33	22.86	0.295	0.15
22.86	24.38	0.295	0.41
24.38	25.90	1.249	0.28
25.90	26.82	2.874	0.99
26.82	27.12	29.633	1.85
27.12	28.65	4.482	1.22
28.65	29.56	5.008	1.39
29.56	30.48	5.008	1.33
30.48	32.00	1.057	0.42
32.00	33.52	2.571	0.72
33.52	35.05	2.571	1.06
35.05	36.57	2.432	0.92
36.57	38.10	1.000	0.22
38.10	39.01	0.329	0.22
39.01	39.62	#N/A	#¡DIV/0!
39.62	40.23	0.459	0.22
40.23	41.14	0.459	0.22
41.14	42.05	0.295	0.22
42.05	42.97	0.411	0.22
42.97	44.19	2.874	0.91
44.19	45.72	2.177	0.86
45.72	47.24	5.008	1.39
47.24	47.85	2.874	0.22
47.85	49.37	2.059	0.30
49.37	50.29	5.008	2.81
50.29	50.90	0.543	0.39



En la tabla 29, se registran los datos de los 6 parámetros, el valor de la clasificación del Q de Barton y algunas observaciones por zonas geotécnicas similares, para los 77 avances del túnel 1. Las profundidades donde cambia la calidad del macizo de un rango a otro se identifican con los cambios de color del valor del RQD y Q, verificando los modelos geomecánicos detallados del RQD y clasificación Q, con un margen de diferencia de 3 m o menos.

Tabla 29. Tabla de resumen de los datos geotécnicos levantados en los frentes de avance de los primeros 148 m del túnel de acceso 1 (Geología de túnel, AUX Colombia SAS., 2012).

abscisa	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Observaciones
KO+012	10	17	1	15	0.33	10	0.00129412	Roca altamente meteorizada + suelo residual
KO+013	10	15	1	15	0.66	10	0.00293333	
KO+014	10	15	1	12	1	10	0.00555556	
KO+015	10	15	1	12	1	8	0.00694444	
KO+016	25	15	1	8	0.66	2.5	0.055	
KO+017	10	15	1	8	1	10	0.00833333	
KO+019	10	15	1	8	1	10	0.00833333	
KO+020	10	6	1	8	0.66	7.5	0.01833333	Roca fracturada y meteorizada
KO+021	15	6	1	10	0.66	7.5	0.022	
KO+023,5	25	9	1	8	0.66	10	0.02291667	
KO+024	15	12	1	8	1	10	0.015625	
KO+025,5	25	9	1	8	0.66	10	0.02291667	
KO+026,5	25	9	2	4	0.66	5	0.18333333	
KO+032,5	30	9	1	8	0.66	10	0.0275	
KO+035	25	6	1	8	1	7.5	0.06944444	
KO+037	30	6	1	8	0.66	10	0.04125	
KO+038,6	20	12	1	8	0.66	10	0.01375	
KO+039,05	25	12	1	10	1	10	0.02083333	
KO+040,5	25	12	1	4	1	2.5	0.20833333	
KO+041,6	10	6	1	12	1	10	0.01388889	
KO+042,44	30	6	1	8	1	10	0.0625	
KO+042,75	30	6	1	8	1	10	0.0625	
KO+043,7	30	12	2	10	1	5	0.1	Roca fracturada
KO+045	30	12	2	8	1	5	0.125	
KO+046	30	9	2	8	1	5	0.16666667	
KO+047,2	30	12	2	8	1	5	0.125	
KO+047,7	35	12	2	8	1	5	0.14583333	
KO+048,4	30	12	2	8	1	5	0.125	
KO+049,8	30	15	2	8	1	5	0.1	



K0+052,8	25	12	1	8	1	5	0.05208333	Roca fracturada con paquetes arcillosos por alteración
K0+053,48	30	12	1	8	1	10	0.03125	
K0+055,63	30	12	1	8	1	10	0.03125	
K0+058,09	25	12	2	8	0.66	10	0.034375	
K0+060,78	35	12	2	8	1	10	0.07291667	
K0+063,74	35	12	2	8	1	5	0.14583333	
K0+062,8	25	12	1	8	1	5	0.05208333	
K0+064,36	30	15	1.5	8	1	5	0.075	
K0+064,75	30	12	1	8	1	7.5	0.04166667	
K0+066,76	31	12	1	8	1	5	0.06458333	
K0+067	30	12	1.5	8	1	5	0.09375	
K0+068,75	30	12	1	8	1	5	0.0625	
K0+069	30	12	1.5	8	1	5	0.09375	
K0+071,85	28	9	1	10	1	10	0.03111111	
K0+072,9	20	12	1	15	1	10	0.01111111	
K0+074,9	18	12	1	15	1	10	0.01	
K0+079,4	15	12	1	10	1	10	0.0125	
K0+080,7	14	12	1	10	1	10	0.01166667	
K0+082,22	20	12	1	12	1	10	0.01388889	
K0+083,0	12	12	1	10	1	10	0.01	
K0+084,58	10	12	1	14	1	10	0.00595238	Paquetes arcillosos_Alteración argílica
K0+085,6	10	12	1	12	1	10	0.00694444	
K0+087	10	12	1	12	1	10	0.00694444	
K0+089,38	10	12	1	12	1	10	0.00694444	
K0+092,45	10	12	1	12	1	10	0.00694444	
K0+094,0	10	12	1	10	1	10	0.00833333	
K0+095,3	25	12	1.5	8	1	2.5	0.15625	
K0+099,08	20	12	1	12	1	10	0.01388889	
K0+101,12	25	12	1.5	10	1	12	0.02604167	
K0+103,6	25	12	1.5	8	1	5	0.078125	
K0+105,8	25	9	1.5	4	1	5	0.20833333	
K0+108,15	25	9	2	4	0.1	5	0.02777778	Roca silicificada + brecha hidrotermal
K0+108,41	25	9	2	4	0.1	5	0.02777778	
K0+108,70	25	9	2	4	0.1	5	0.02777778	
K0+110,3	25	9	2	4	0.1	2.5	0.05555556	
K0+111,55	25	9	2	4	0.1	2.5	0.05555556	
K0+112,2	30	9	2	4	0.1	2.5	0.06666667	
K0+112,84	25	6	2	3	0.1	2.5	0.11111111	
K0+114,1	28	6	2	3	0.1	2.5	0.12444444	
K0+117,24	40	6	2	4	0.1	2.5	0.13333333	
K0+119,8	40	6	2	3	0.1	2.5	0.17777778	
K0+119,9	40	6	2	3	0.1	2.5	0.17777778	
K0+121,63	32	12	1.5	3	0.2	2.5	0.10666667	
K0+126,74	35	12	1.5	3	0.2	2.5	0.11666667	
K0+129,3	45	12	2	6	0.2	2.5	0.1	
K0+138,0	22	12	2	8	0.33	2.5	0.0605	
K0+142,8	37	12	2	8	0.66	2.5	0.2035	
K0+148,27	45	12	2	8	0.66	2.5	0.2475	



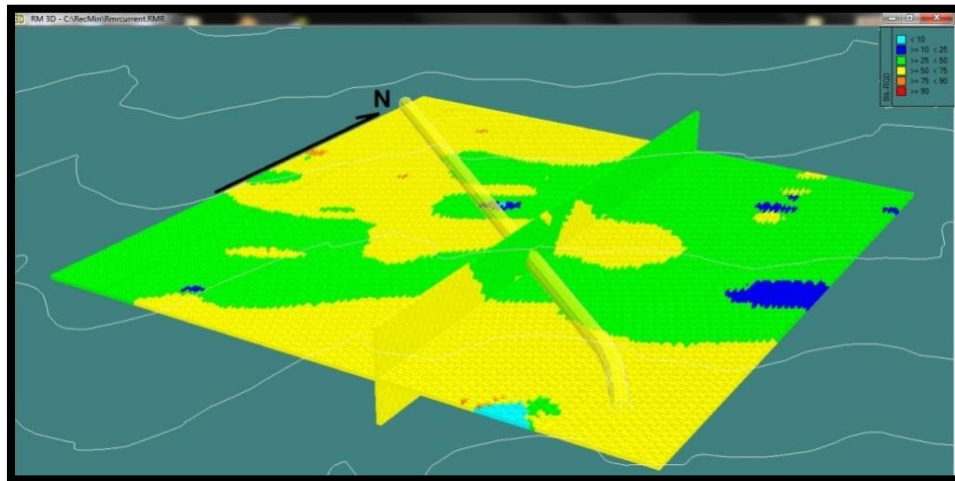
Con los datos de la tabla 28 se conoce que la capa de suelo residual ubicada en el emboquille del túnel 1 posee un espesor de aproximadamente 20 m en la figura 41 que ilustra el modelo de interpolación del parámetro RQD detallado para túnel 1, en el cual no se reconoce dicha capa, porque, debido a la ausencia de datos de condiciones de contorno que limiten el modelo y permitan modelar la posible capa de suelo.

También del modelo de bloques específico se determina que inmediatamente después de atravesar el suelo y la roca madre meteorizada hasta los 67 m de profundidad, el RQD se mantiene en el rango de calidad media (50 – 75%, color amarillo); mientras según los datos de campo la profundidad es de 70 m y los valores de RQD se encuentran un rango por debajo del modelo, es decir, la calidad definida en campo es mala (25 – 50%, color verde, tabla 29).

Entre los 67 y 130 m de profundidad según el modelo de la figura 41 el túnel cortara un volumen de macizo rocoso con RQD en el rango de calidad mala (25 – 50%, color verde); mientras los datos de los avances indican calidad muy mala (un rango por debajo del modelo), pero solo hasta una profundidad de 100 m, donde la calidad vuelve al rango de calidad mala (color verde en la tabla 29).

Finalmente con los valores de la clasificación del Q de Barton del modelo de bloques y los datos tomados en campo, los resultados son similares con los definidos a manera de ejemplo con el modelo de RQD (figura 41). Entonces se puede concluir que los resultados de los modelos de bloques detallados para cada acceso son bastante acordes con la realidad y pueden ser utilizados como guías en las fases constructivas y de mantenimiento de los accesos, con la salvedad que los rangos a utilizar en casos reales deben ser un rango inferior al obtenido en el modelo de bloques.

Figura 41. Modelo de bloques del parámetro geomecánico del Rock Quality Designation (2*2*2 m) para el volumen de macizo rocoso que contendrá el Túnel 1.



Con información importante, se resalta que conforme avanza la construcción de los túneles exploratorios o de acceso minero, aumenta el conocimiento del comportamiento geomecánico del macizo rocoso de interés, dado que en el frente de la excavación se realizan descripciones y toma de datos geológicos y geotécnicos, para disminuir la incertidumbre de los modelos teóricos previos e incrementar la seguridad y productividad de la actividad minera.

Los valores de UCS (resistencia de la matriz rocosa en Mega-pascales) obtenidos con el ensayo de carga puntual (PLT) para tamos de pozos descritos, se iban a utilizar también para generar modelos, pero se presentaron algunos inconvenientes con la base de datos generada en el software RecMin, motivo por el cual finalmente este parámetro geomecánico no se logró modelar.



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- La zona de estudio está compuesta en su totalidad por rocas metamórficas pertenecientes a la unidad del Neis de Bucaramanga, las mismas poseen un aspecto foliado y variaciones composicionales importantes, se encontraron neises biotíticos, neises hornbléndicos, neises cuarzo-feldespáticos, anfibolitas y migmatitas. Y las brechas mineralizadas generalmente silicificadas, cortan subverticalmente la unidad del Neis de Bucaramanga (roca caja) en varios segmentos (mineral explotable).
- En las zonas de cizalla producidas por la falla de La Baja, se encuentran enriquecidas en arcillas, lo cual producen un comportamiento singular del macizo en estas zonas, es decir, forma zonas lineales de calidad excepcionalmente mala de espesores centimétricos principalmente a métricos.
- El dato promedio del plano de la falla La Baja es 328/72 y utilizando el modelo de cizalla simple junto con estrías y escalones de falla, se definió para esta falla local una cinemática dextral con un leve componente normal.
- A partir de los 2534 datos de discontinuidades tomados en campo se definieron tres sets locales para el macizo rocoso (MR) del presente estudio, a partir del análisis estructural: Set 1=198/83, Set 2=118/46 y Set 3=259/65 (foliación).
- La aparición del agua subterránea ocurre por el set de discontinuidades 118/46, el cual es opuesto al plano de falla La Baja, es importante este dato para definir un modelo de flujo en medio fracturado.



- La calidad y el comportamiento geomecánico de la roca encajante de la mineralización es generalmente de malo a bueno según los modelos de interpolación geomecánica, siempre que la roca no presente alteración hidrotermal o meteorización severa, lo cual hace bajar la calidad del macizo rocoso en esas zonas considerablemente entre muy mala a excepcionalmente mala.
- Siendo la calidad de la roca caja y las brechas mineralizadas buena, en términos generales; y sabiendo que la geometría de los cuerpos mineralizados es tabular y subvertical, el método de explotación definido para los depósitos de La Mascota y El Gigante es el denominado sublevel stopping, de alta producción y baja dilución mineral.
- Aplicando el modelado de cuñas en UNWEDGE se obtuvieron sostenimientos comparables a los definidos por la clasificación geomecánica del Q de Barton, de acuerdo con los obtenidos por los modelos de interpolación obtenidos por el método de interpolación IDW. Para el bloque T1 el sostenimiento definido es solo capa de concreto lanzado, aunque para el bloque T3 el sostenimiento es capa de concreto proyectado y pernos espaciados cada 1.5 m de 3 m de largo, similar al sostenimiento definido de acuerdo con los resultados de los modelos geomecánicos de interpolación.
- Se concluye con ayuda de las observaciones y correlación de los datos de las descripciones geológicas y geotécnicas de testigos de perforación adamantina, que los volúmenes de rocas circundantes a las brechas mineralizadas, la calidad del macizo es generalmente menor o también la presencia importante de arcilla rellanando las diaclasas en la brecha generar una disminución en calidad geomecánica local.



- Los sostenimientos definidos con los resultados de los modelos de interpolación, son:

Para el caso de macizo rocoso medio (Q entre 4 y 10): Concreto lanzado de 3 cm de espesor con fibras de polímero, solo hasta la mitad del hastial. Sin malla de refuerzo. Pernos helicoidales de 2 m, sistemáticos inyectados sin tensión con espaciados de 1.5 m, cementados con resina epóxica. Arcos de sostenimiento cada 1.5 a 2 m.

Para el caso de macizo rocoso malo (Q entre 1 y 4): Concreto lanzado de 5 cm de espesor con fibras de polímero, solo hasta la mitad del hastial. Con malla de refuerzo. Pernos helicoidales de 2 m, sistemáticos inyectados sin tensión con espaciados de 1 m, cementados con resina epóxica. Arcos de sostenimiento cada metro o menos de ser necesario (zonas de falla 0.5 m).

- Con las verificaciones realizadas se concluyen que los modelos generales permiten visualizar las variaciones regionales de la calidad y los parámetros geomecánicos en tres dimensiones hasta profundidades de 600 a 700 m; pero debido a la baja resolución de estos modelos no son recomendables para tomar decisiones sobre proyecto minero. Mientras los modelos específicos si pueden ser utilizados para tomar decisiones previas sobre las actividades que involucren los macizos rocosos cercanos a los túneles de acceso 1 y 3.
- Con el retro-análisis realizado a los modelos de interpolación, se logró concluir que los valores obtenidos deben ser considerados un rango inferior para poder ser aplicados en la realidad. La sobre estimación es resultado de los datos de entrada con los cuales se generaron los modelos (logueo de pozos viejos).



8.2. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios detallados sobre la cinemática y tensores de esfuerzos locales que controlan la falla La Baja. Se recomienda realizar en esta área estudios de geología estructural detallada para definir los estados de esfuerzos en diferentes épocas de ser posible, basándose en otras fuentes de datos como mecanismos focales de sismos.
- Definir mediante ensayos geomecánicos de laboratorio (como ensayos de compresión uniaxial y tracción) las propiedades de la matriz rocosa y relacionar los cambios de dichas propiedades de acuerdo con la variación del tipo y grado de alteración hidrotermal, para poder realizar un modelo tenso-deformacional del macizo rocoso que contendrá los túneles de acceso y desarrollo minero.
- Realizar un modelo de alteraciones hidrotermales 3D y compararlo con los modelos geomecánicos generados en este proyecto o con futuros modelos geomecánicos mejorados.
- Realizar el relevo geotécnico con la nueva metodología, los pozos de exploración antiguos, es decir, desde el pozo LB001 hasta el LB 444.
- Verificar los modelos presentados con la toma de datos geomecánicos en los frentes de los túneles durante la fase constructiva.
- Mantener el modelo tridimensional de interpolación actualizado conforme se obtengan nuevos datos provenientes de las descripciones de los núcleos de perforación, para apoyar la toma de decisiones. Se recomienda utilizar modelos geoestadísticos de interpolación para reducir el error generado por el tipo de método.



- Para que el proyecto minero sea exitoso, es necesario crear y mantener en forma regular el modelo geotécnico obtenido en este estudio. Al tener un modelo geomecánico en 3D constantemente actualizado, las diferentes áreas de operaciones de la empresa podrán visualizar rápidamente las características del macizo rocoso en la mina y podrán tomar decisiones mejor fundamentadas.



BIBLIOGRAFIA

AGUIRRE, Carlos. Desarrollo de un modelo geotécnico en 3D en Compañía minera Antamina para optimizar operaciones en mina. Publicación privada, 2008.

AUSENCO. La Bodega: Análisis Hidrológico e Hidrogeológico para la construcción y Operación del Túnel de Exploración La Mascota. Publicación privada, Ventana Gold Corporation. Octubre de 2010. 609 p.

BARRERO, Darío *et al.* Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2007. 78-79 p.

CARRILLO, Maureen *et al.* Clasificación Geomecánica y Análisis de Estabilidad de Taludes del Macizo Rocoso Coris, Cartago, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. Costa Rica (14, Feb., 2002). 91-96 p.

CARVAJAL, Henry *et al.* Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica. INGEOMINAS, Volumen I. Bogotá, diciembre de 2004. 92 p.

CLAVIJO, Jairo; MANTILLA, Luis; PINTO, Jorge; BERNAL, Luis. Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, norte del Valle Medio del Magdalena y noreste de la Cordillera Oriental. Revista de Geología – Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga Junio 2008. 45-62 p.



CLAVIJO, Jairo; ROYERO, José. Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Santander en escala 1:300.000. INGEOMINAS, 2001. 91p.

CORTES, Martín & ANGELIER, Jacques. Paleostreeevolution of thenorthern andes (Eastern Cordillera of Colombia). Implicacionsonplatekinematics of the South Caribbeanregion. Revista TECTONICS, Vol. 24, 2005. 27 p.

DEMPERS, G.; SEYMOUR, C. & HARRIS, M. OptimisingGeotechnical Logging toAccuratelyRepresenttheGeotechnicalEnvironment. SecondAustralianGroung Control in MiningConference, Sydney, 23-24 Nov, 2010.

ETAYO, Fernando *et al.* Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. INGEOMINAS, 1983. 118 p.

GONZALEZ DE VALLEJO, Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. PEARSON Prentice Hall, 2002. 744 p.

JIMÉNEZ, Humberto. Anatomía del sistema de ecología basada en zonas de vida de L. R. Holdridge. Tropical Science Center, 1.993. 23 p.

KARZULOVIC, Antonio. Método del índice Q. Publicación de clase.

KATHLEEN, Altman *et al.* PreliminaryAssessment La Bodega Proyect. Santander - Colombia. VENTANA GOLD CORP, Noviembre 2010. 242 p.

LOPEZ JIMENO, Carlos *et al.* Ingeniería de Túneles: LIBRO 1. Madrid. ENTORNO GRAFICO, S. L., 1998. 460 p.



LOPEZ RAMOS, Eduardo. Uppercrust models of Colombia – Cross sections and tectono stratigraphic terrains location map. INGEOMINAS, 2003.

MANTILLA, Luis; MENDOZA, Hernando; BISSIG, Thomas; CRAIG, Hart. Nuevas Evidencias sobre el Magmatismo Mioceno en el Distrito Minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Revista de Geología – Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga Junio 2011. 43-68 p.

MURILLO, Diego; ORTEGA, Irene; CARRILLO, Juan & RENDÓN. Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruidos en entornos urbanos. Revista Ing. USBMed. Enero-Junio 2012. 7-8 p.

NAVARRO CARRASCO, Salvador *et al.* Geotecnia Aplicada a la Construcción de Túneles. Asignatura de obras geotécnicas, 2011.

PARIS, Gabriel *et al.* Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey. Open-File Report 00-0284, 2000. 66 p.

PALMSTRÖM, Arild. Combining the RMR, Q y R_{Mi} classification systems. www.rockmass.com. Oslo 2009. 25 p.

PAZMIÑO, Andrea. Variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones en zonas de montaña: caso del volcán Antisana. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito Octubre 2010. 35-41 p.



RAMÍREZ, P.; DE LA CUADRA, L.; LAIN, R.; GRIJALBO, E. Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea. Instituto Geológico y Minero de España 1991. 354 p.

RUIZ, Marta *et al.* Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa de Algunas Laderas de los Municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Informe Final de la subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental. INGEOMINAS – CDMB – ALCALDIAS. 611p.

UREÑA, Cindy; ZULUAGA, Carlos. Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas - Santander. Edición Especial de la Revista de Geología Colombiana 36 N.1. 37-56 p.

WARD, D.E. *et al.* Memoria Explicativa: Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona. INGEOMINAS, 1973. 144 p.



ANEXOS

Anexo A MAPAS



Anexo B

FORMATOS DE TOMA DE DATOS



REGISTRO GEOTÉCNICO MODELACIÓN TÚNEL 1 y 3							
Fecha:	31/10/2012	CORD. X:	1'307,595	CROD. Y:	1'129.340	Altitud:	2.686
Hora:	07:30	Hoja No.	1	PK Actual:	X	Avance [m]:	X
Tomado por:	Wilfredy Morales	Revisión por:	X	PK Anterior:	X	Azimut:	X

LITOLOGÍA Y ALTERACIÓN		Calidad del Macizo Rocoso (Clasificación Q de Barton)		
Litología:	Tonalita - Alaskita Alt.	CLASIFICACIÓN	Valor	Descripción
Dureza:	R4 y R1	RQD	66.6	Calidad del Macizo Rocoso es Media
Código muestra:	TW-001	Jn	12	3 familias o sets de diaclasas y algunas aleatorias
Tipo de muestreo:	Litológico	Jr	3	Superficie de las discontinuidades rugosas y onduladas generalmente
Alteración:	Argílica W	Ja	2	Paredes de las juntas ligeramente alteradas y manchadas
Mineralogía	Plg, Qtz, Feld K y ± Ms	Jw	1	Discontinuidades seca y otras algo húmedas
Recolector:	Wilfredy Morales	SRF	7.5	Varias zonas de fracturación en rocas competentes, bloques sueltos
		Q	1.11	Roca clasificada geomecánicamente como MALA

% SULFUROS								
Py	Cpy	Bo	Co	Mo	Cu	Mt	Ag	Au
Aparición de Hematita-Especularita en las fracturas alteradas de la roca								

PROYECCIÓN GRÁFICA DEL AFLORAMIENTO	ESTEREOGRAFÍA

DESCRIPCIÓN DEL AFLORAMIENTO

GEOLOGÍA (Litología, textura, mineralogía, color, tamaño de grano, alteración, dureza, etc).

1) TONALITA a DIORITA: con textura fanerítica de grano grueso, color negra con blanco. Mineralogía: Qtz 25%, Plg 20% y Anf 55%. Litología no alterada y con dureza R5.

2) Alaskita (Boca Túnel artesanal): textura fanerítica, equigranular, de grano grueso, de color verde-blanco y rosado-verde claro. Mineralogía: Qtz 10%, Feld K 30%, Plg Alterada 55% y Ms 5% aproximadamente. Dureza de la matriz rocosa generalmente R1 pero con algunas variaciones hasta R4, alteración Argílica Baja.

Formato para la toma de datos en campo según la metodología del Q de Barton, formato de la línea geotécnica D1 (AUX Colombia SAS, 2012).



MAPEO ESTRUCTURAL											
DISCONTINUIDADES				Longitud	Espaciamiento	Alteración	Apertura	Relleno	Rugosidad	Forma	Agua
Set N° Jn	Tipo de set	Dip (°)	Ddip (°)								
1	0	77	155	2	3	4	4	1	4	2	1
2	0	45	278	2	3	3	3	1	1	1	1
3	0	86	249	2	3	2	3	1	3	2	1
1	0	61	172								
1	0	81	174								
1	0	87	183								
1	0	77	162								
A	0	46	68								
2	0	40	261								
A	0	56	86								
1	0	85	172								
A	0	52	242								
2	0	25	234								
A	0	64	48								
1	0	83	177								
3	0	87	269								
A	0	77	7								
3	0	84	261								
1	0	70	166								
2	0	69	103								
2	0	45	237								
2	0	88	346								
2	0	78	8								
A	0	82	326								
2	0	43	9								
1	0	88	154								
A	0	67	61								
1	0	73	171								
2	0	69	331								
2	0	81	26								
A	0	47	61								
2	0	79	343								
2	0	78	356								
1	0	80	149								
2	0	72	336								
2	0	71	283								
1	0	87	182								
A	0	58	187								
A	0	86	197								
2	0	77	335								
A	0	23	358								
2	0	70	32								
A	0	87	173								
A	0	43	65								
A	0	71	343								
A	0	59	98								
A	0	41	42								
A	0	13	70								
2	0	77	2								
A	0	63	47								
TIPO	LONGITUD	ESPACIAMIENTO	ALTERACIÓN	APERTURA	RELLENO	RUGOSIDAD	FORMA	AGUA			
0 Días	1 < 2 m	1 > 2 m	1 Inalterada	1 Nada		1 Muy rugoso	1 Plana	1 Seca			
1 Cizalla	2 1 - 3 m	2 0,6 - 2 m	2 Lig alterada	2 < 0,1 mm	1 Nada	2 Rugoso	2 Ondulada	2 Filtración			
2 Falla	3 3 - 10 m	3 0,2 - 0,6 m	3 Mod alterada	3 0,1 - 1 mm	2 Duro < 5mm	3 Lig rugoso	3 Muy ond	3 Flujo (l/s)			
3 Estratificación	4 10 - 20 m	4 0,06 - 0,2 m	4 Muy alterada	4 mm	3 Duro > 5mm	4 Ondulada					
4 Foliación	5 > 20 m	5 < 60 mm	5 Descompuesta	4 1 - 5 mm	4 Blando < 5mm	5 Suave					
5 Esquistosidad				5 > 5 mm	5 Blando > 5mm						



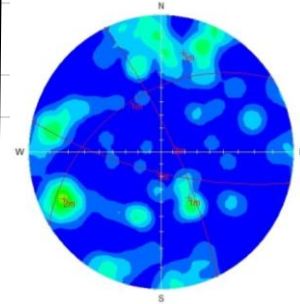
REGISTRO GEOTÉCNICO MODELACIÓN TÚNEL 1 y 3							
Fecha:	31/10/2012	CORD. X:	1'307.591	CROD. Y:	1'129.340	Altitud:	2.685
Hora:	09:30	Hoja No.	2	PK Actual:	X	Avance [m]:	X
Tomado por:	Wilfredy Morales	Revisión por:	X	PK Anterior:	X	Azmut:	X

LITOLOGÍA Y ALTERACIÓN		Calidad del Macizo Rocoso (Clasificación Q de Barton)		
Litología:	Tonalita Alt	CLASIFICACIÓN	Valor	Descripción
Dureza:	R1 - R2	RQD	30	Calidad del Macizo Rocoso es Mala
Código muestra:	TW-002	Jn	12	3 familias o sets de diaclasas (bloques tetraedrales) y algunas aleatorias
Tipo de muestreo:	Litológico	Jr	1.5	Superficie de las discontinuidades ligeramente rugosas y generalmente planas
Alteración:	Argilica W	Ja	2	Paredes de las juntas ligeramente manchadas (óxidos y algo de clay)
Mineralogía	Plg, Qtz, Hem (Hbl)	Jw	1	Discontinuidades seca y otras algo húmedas muchas con goteo leve (20-30 ml/min aprox.)
Recolector:	Wilfredy Morales	SRF	7.5	Varias zonas de fracturación en rocas competentes, bloques sueltos
		Q	0.25	Roca clasificada geomecánicamente como MUY MALA

% SULFUROS									
Py	Cpy	Bo	Co	Mo	Cu	Mt	Ag	Au	

Formación de Hematita-Especcularita por alteración de los minerales máficos

PROYECCIÓN GRÁFICA DEL AFLORAMIENTO	ESTEREOGRAFÍA
-------------------------------------	---------------



DESCRIPCIÓN DEL AFLORAMIENTO

GEOLOGÍA (Litología, textura, mineralogía, color, tamaño de grano, alteración, dureza, etc).
 1) TONALITA a DIORITA: con textura fanerítica de grano grueso, color gris violeta. Mineralogía: Plg 40%, Hbl (alterada a óxidos) 55%, Qtz 12 - 14% y otros minerales como Ms y accesorios 1-3%. Litología con alteración hidrotermal Argilica Baja y también muy alterada por oxidación y con dureza R2 (friable cuando la dureza es R1).

Formato para la toma de datos en campo según la metodología del Q de Barton, formato de la línea geotécnica D2 (AUX Colombia SAS, 2012).



MAPEO ESTRUCTURAL											
DISCONTINUIDADES				Longitud	Espaciamiento	Alteración	Apertura	Relleno	Rugosidad	Forma	Apda
Set N° Jn	Tipo de set	Dip (°)	Ddip (°)								
1	0	62	187	2	3	3	4	4	3	1	2
2	0	27	318	1	3	2	3	4	3	2	2
3	0	55	29	1	3	2	4	1	3	1	1
1	0	77	182								
1	0	76	200								
1	0	80	206								
2	0	43	327								
2	0	34	1								
A	0	55	232								
A	0	72	230								
1	0	75	202								
A	0	90	62								
1	0	64	164								
1	0	80	174								
A	0	41	80								
2	0	69	304								
3	0	43	229								
A	0	71	115								
A	0	83	69								
2	0	51	325								
3	0	79	15								
3	0	88	27								
1	0	82	165								
2	0	50	328								
3	0	86	21								
A	0	62	124								
A	0	46	103								
1	0	45	160								
1	0	75	178								
A	0	77	72								
A	0	42	260								
A	0	80	107								
1	0	83	200								
1	0	67	212								
2	0	29	12								
1	0	87	176								
3	0	88	357								
A	0	77	336								
3	0	87	340								
A	0	82	94								
1	0	83	160								
A	0	80	102								
A	0	72	115								
3	0	50	341								
A	0	73	68								
2	0	51	332								
1	0	65	210								
2	0	62	306								
A	0	88	86								
A	0	75	65								
3	0	54	14								
1	0	41	218								
A	0	82	64								
A	0	73	100								
A	0	77	60								
2	0	54	278								
3	0	83	350								
3	0	72	5								
A	0	73	250								
1	0	72	187								
1	0	78	148								
2	0	70	252								
2	0	35	307								
3	0	88	30								
2	0	33	328								
1	0	52	137								
1	0	65	185								
A	0	82	270								
3	0	53	18								
1	0	66	164								



Anexo C
FOTOGRAFÍAS Y ESTEREOFASILLAS EN DIPS DEL
TRABAJO DE CAMPO



D1



D2



D3



D4



D5



D6



D7



D8



D9



D10



D11



D12



D13



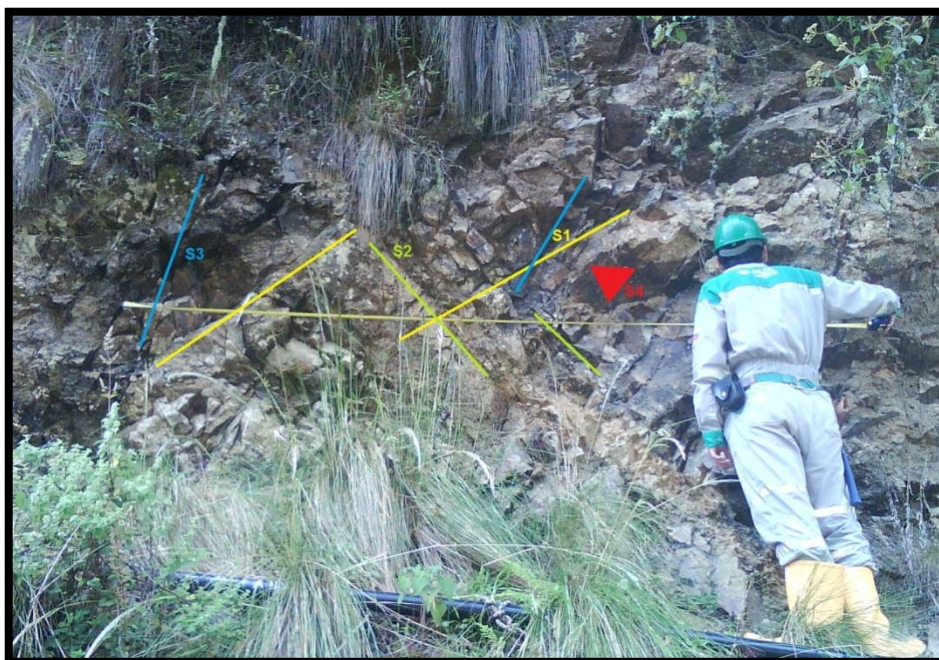
D14



D15



D16



D17



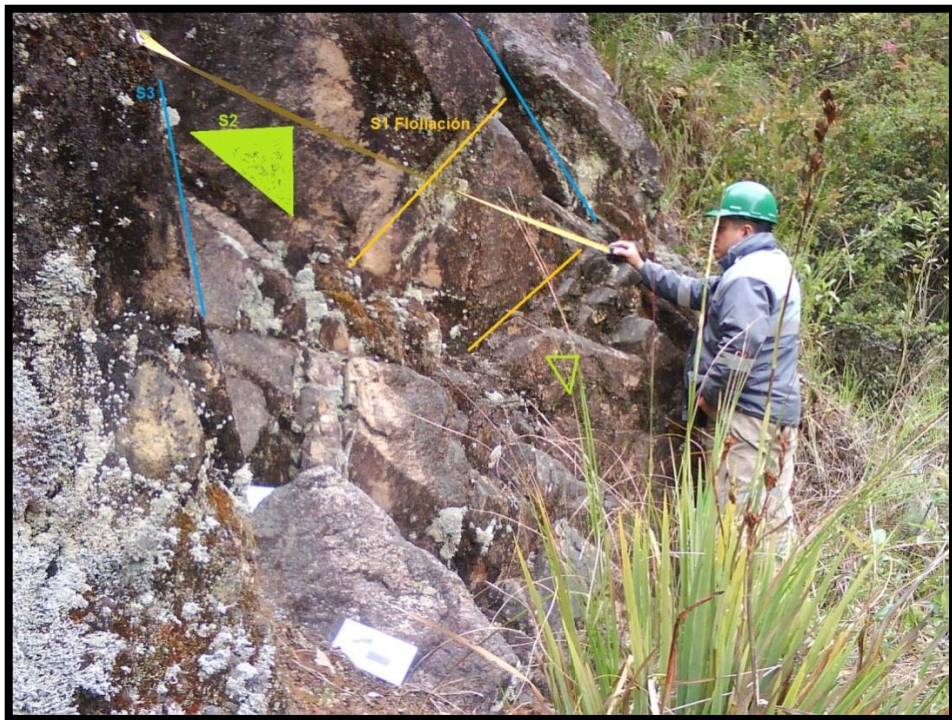
D18



D19



D20



D21



D22



D23



D24



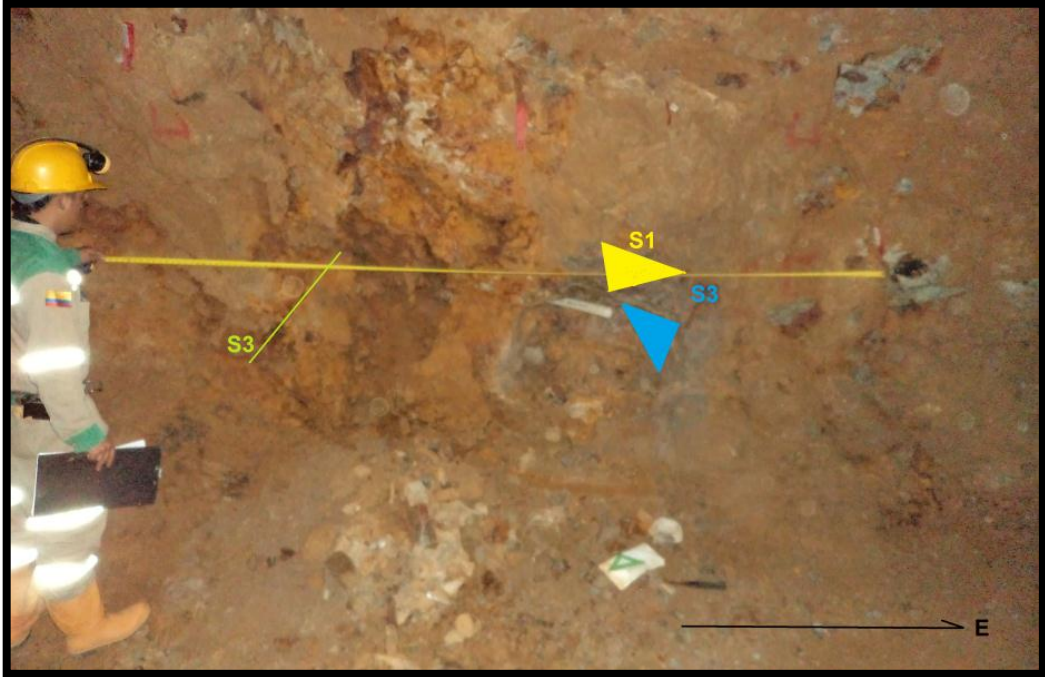
D25



S1



S2



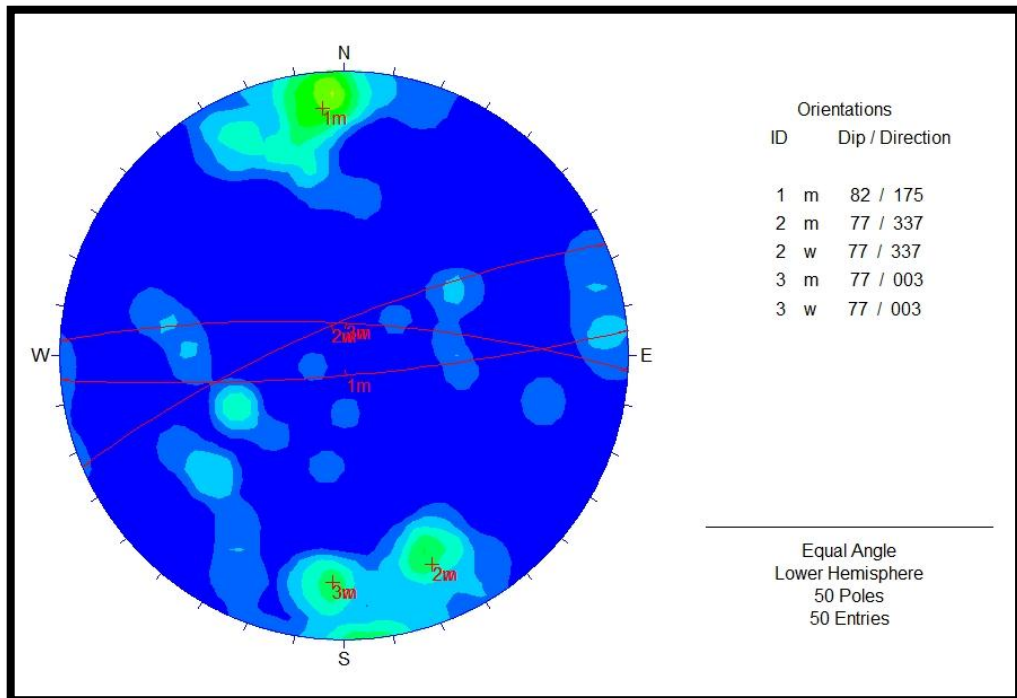
S3



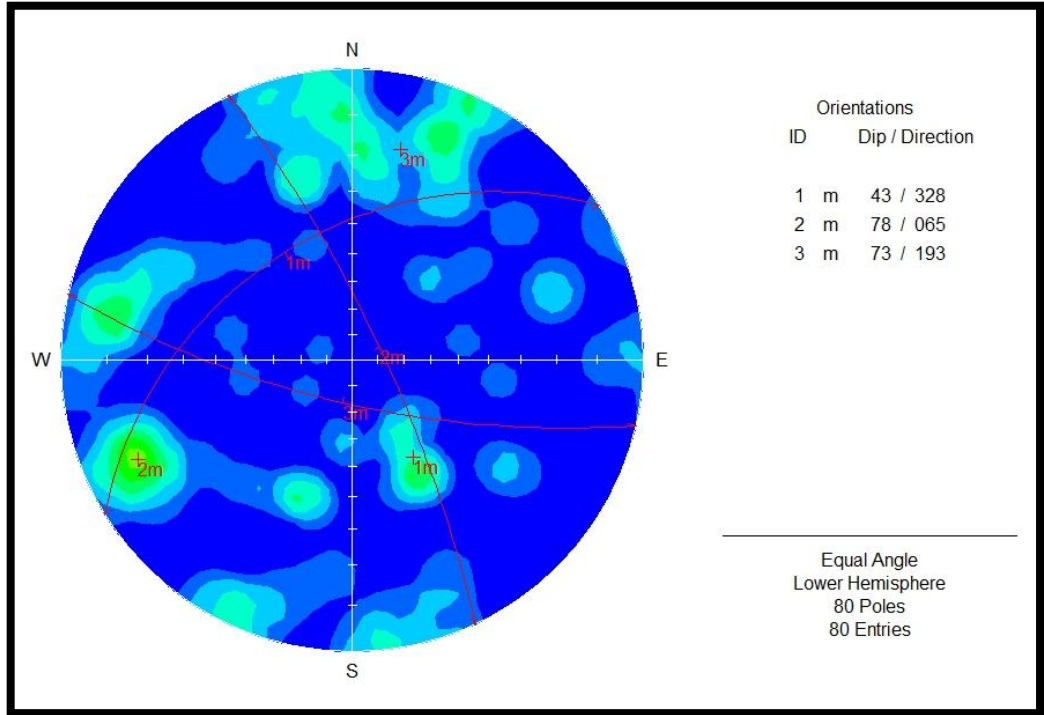
S4



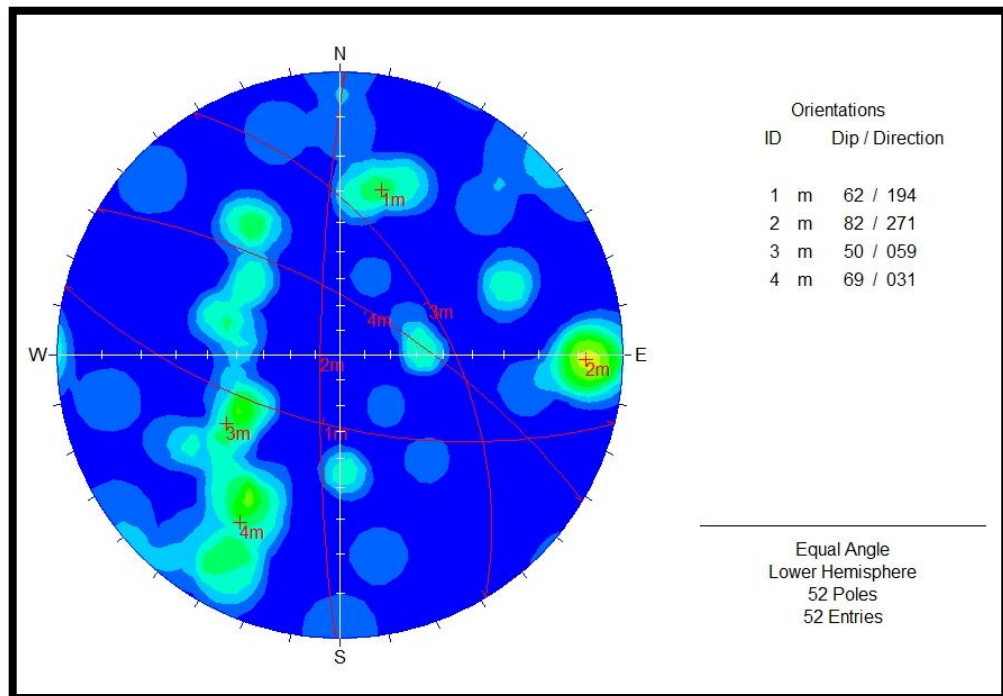
S5



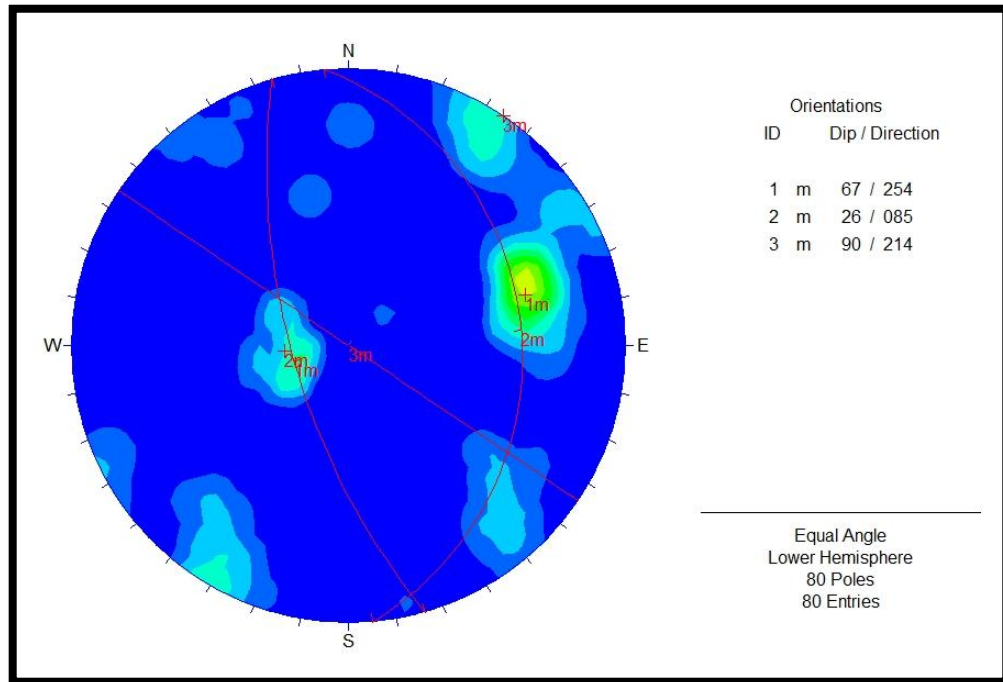
D1



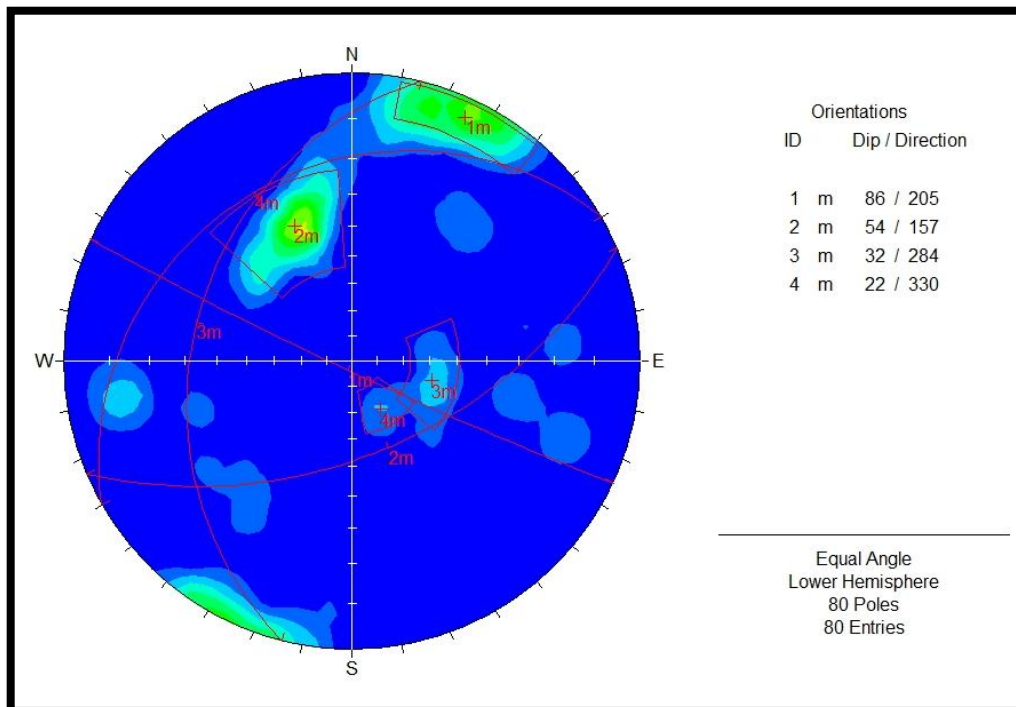
D2



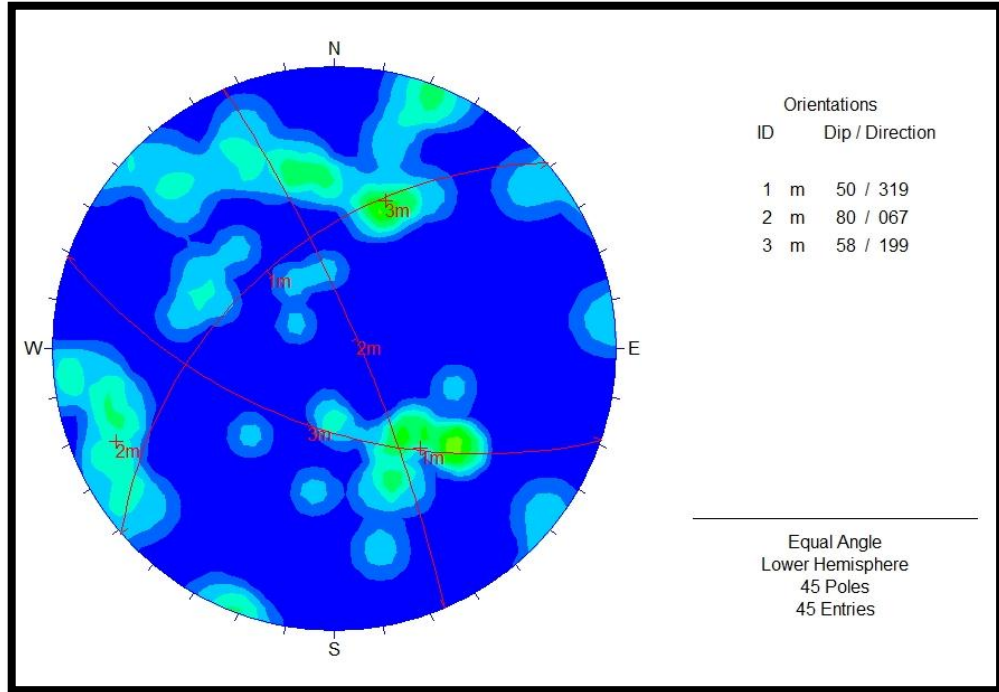
D3



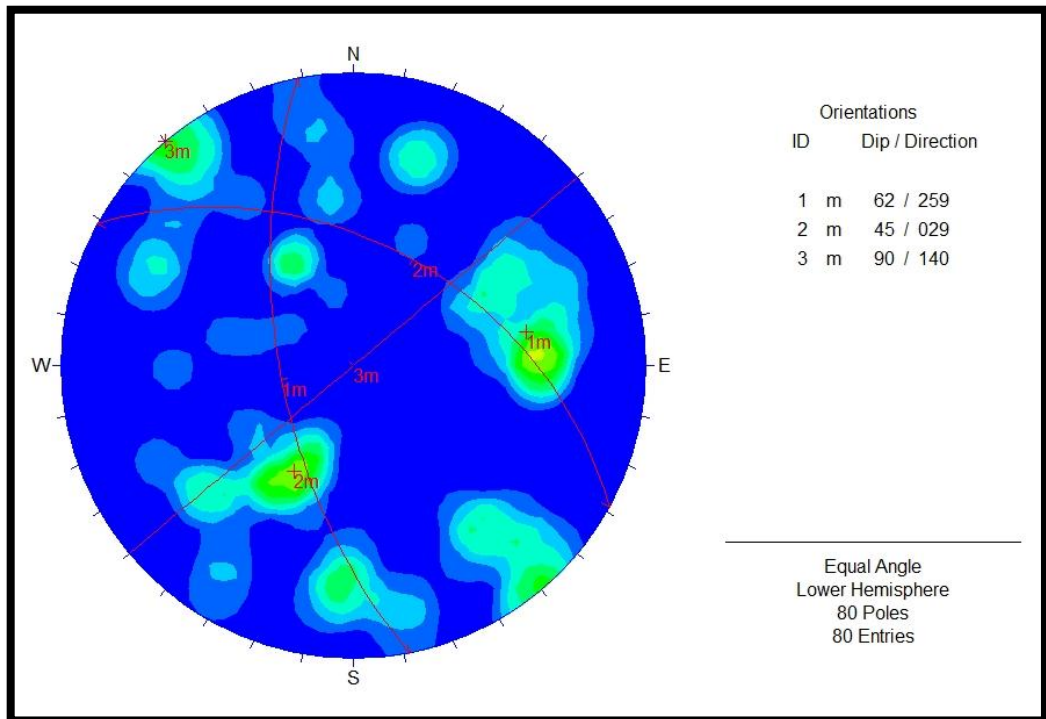
D4



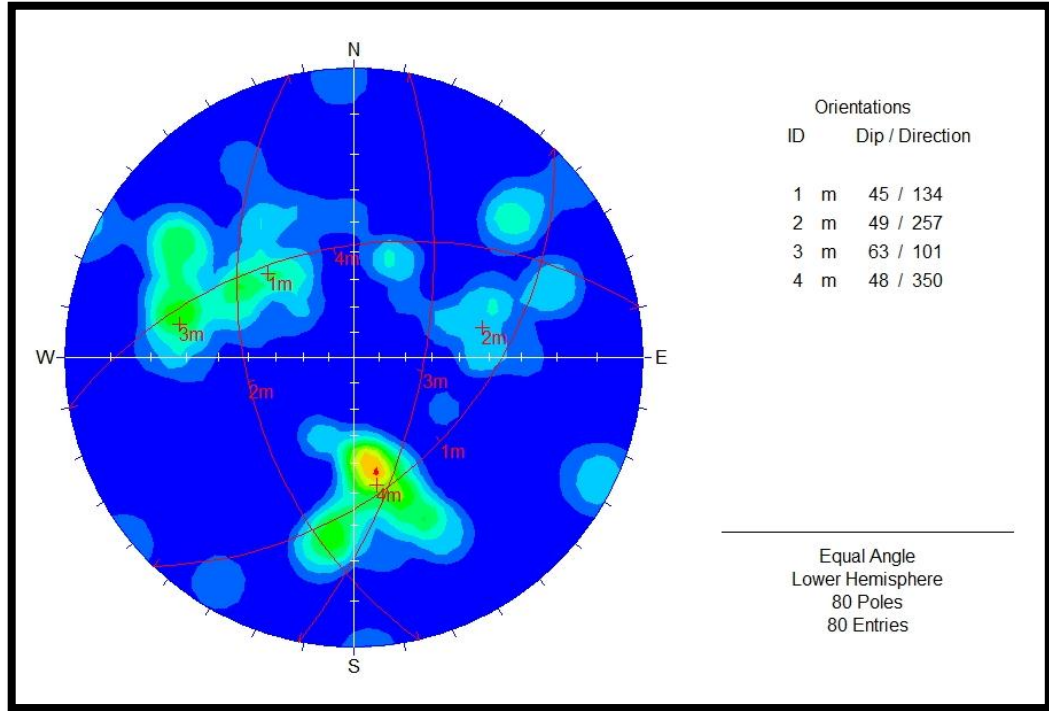
D5



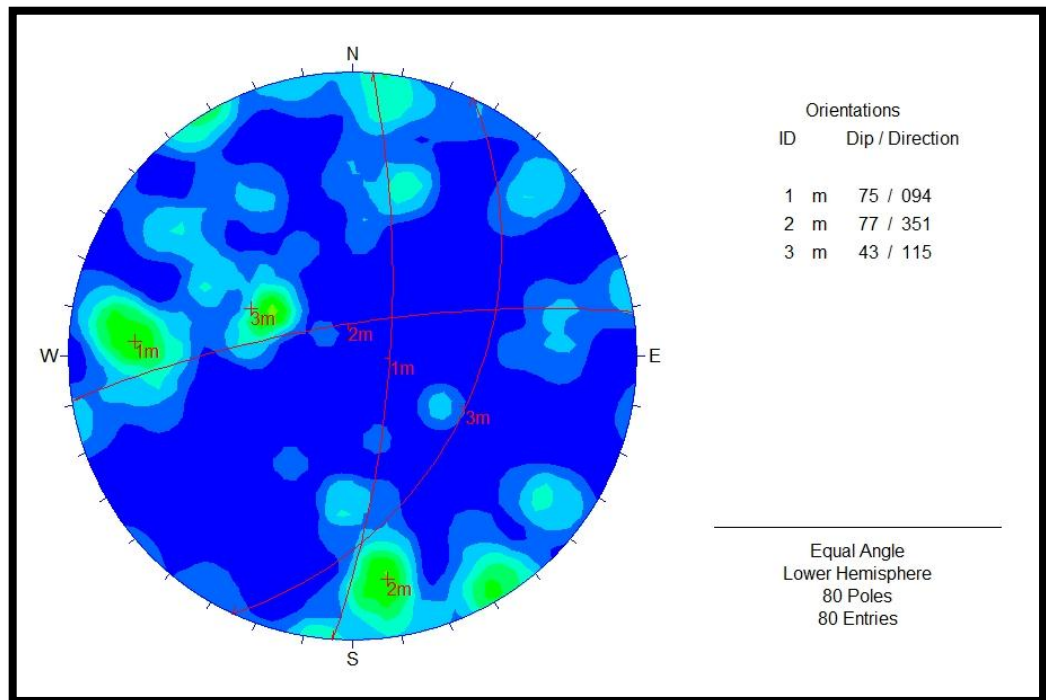
D6



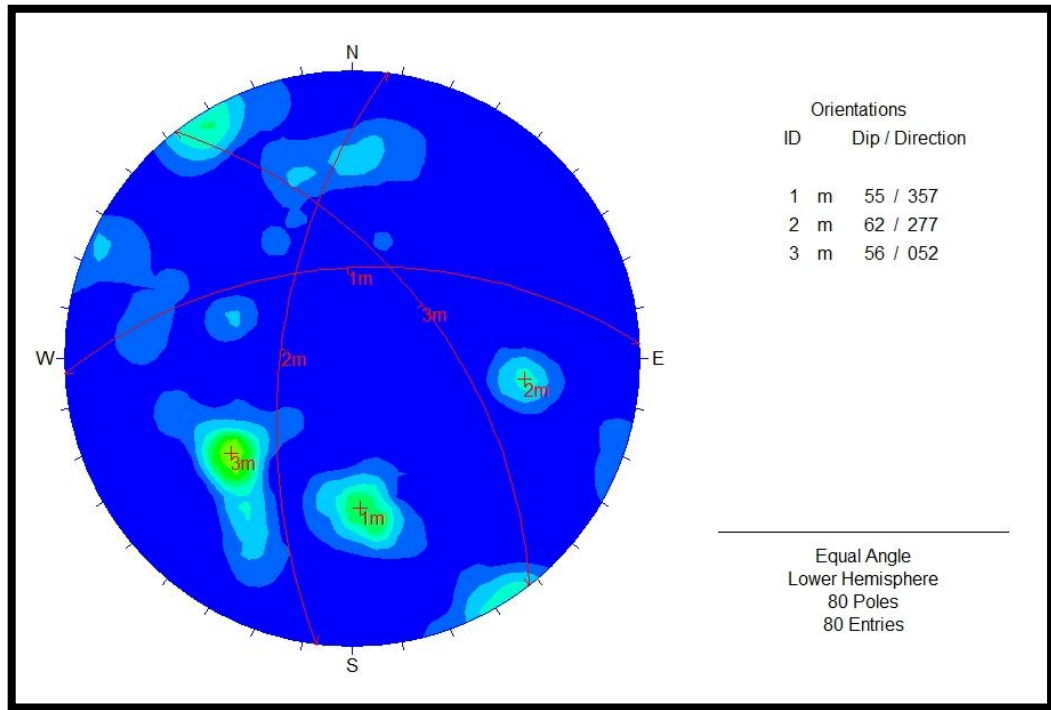
D7



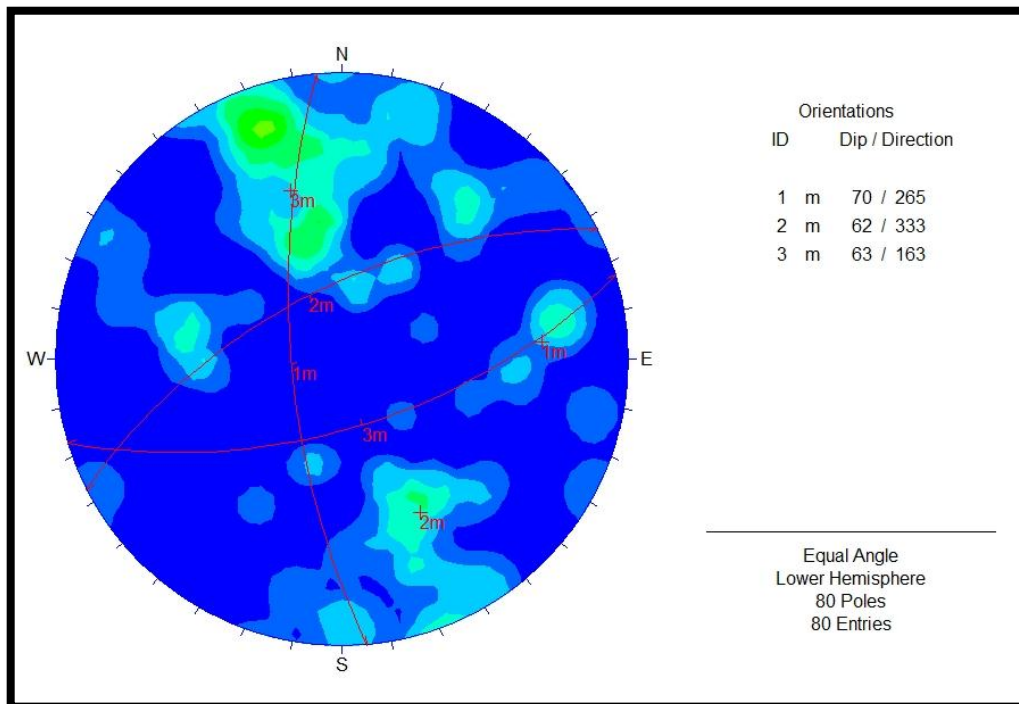
D8



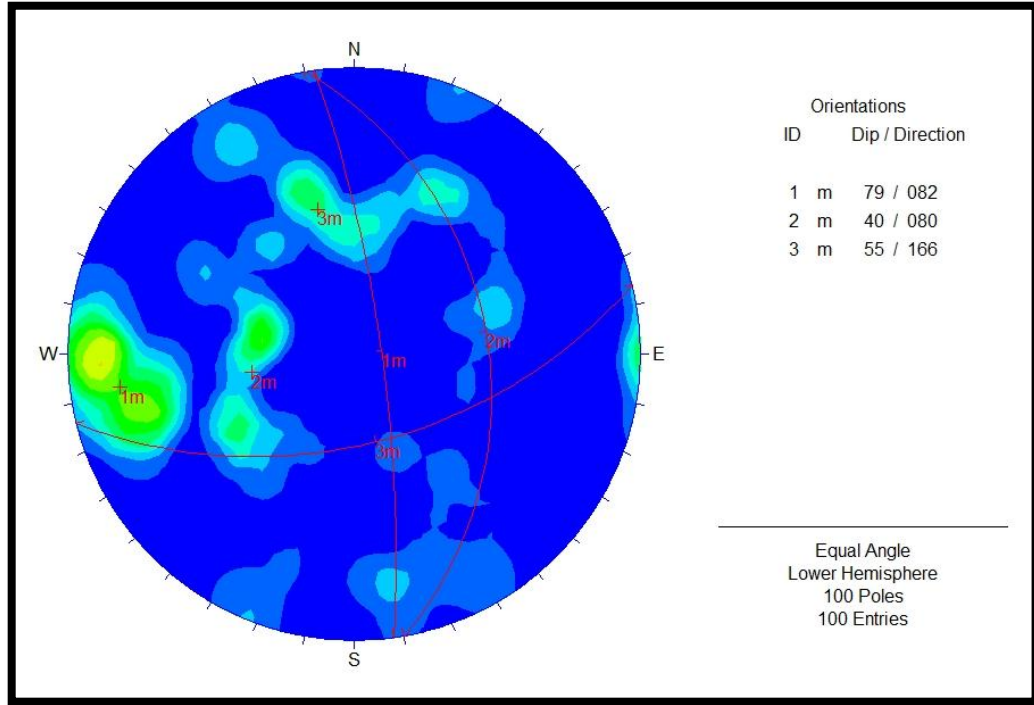
D9



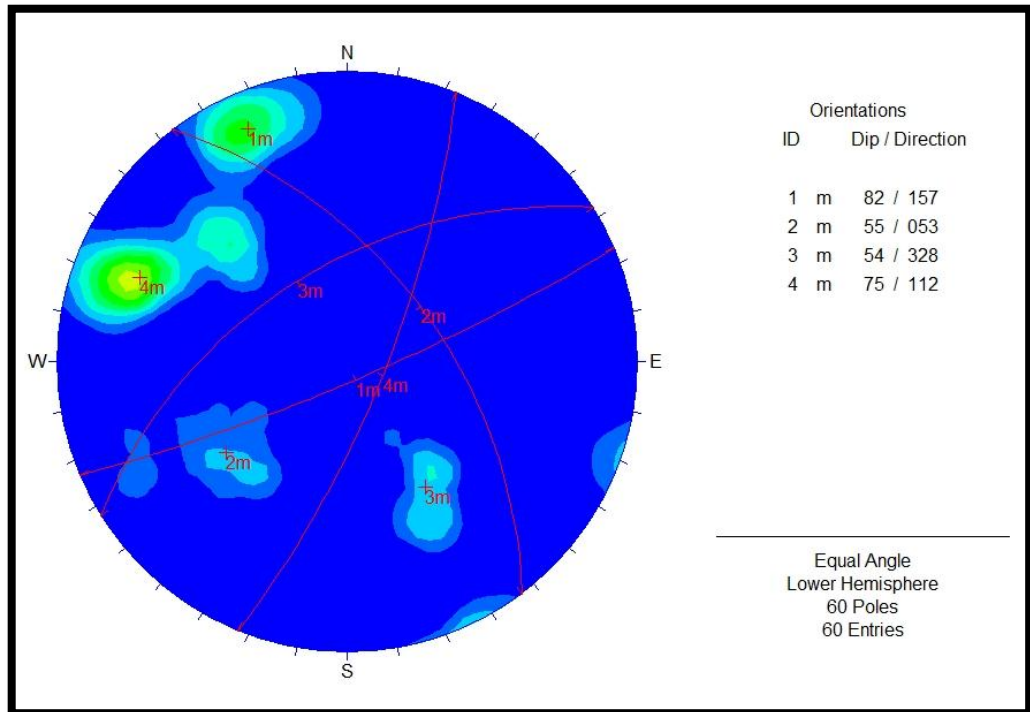
D10



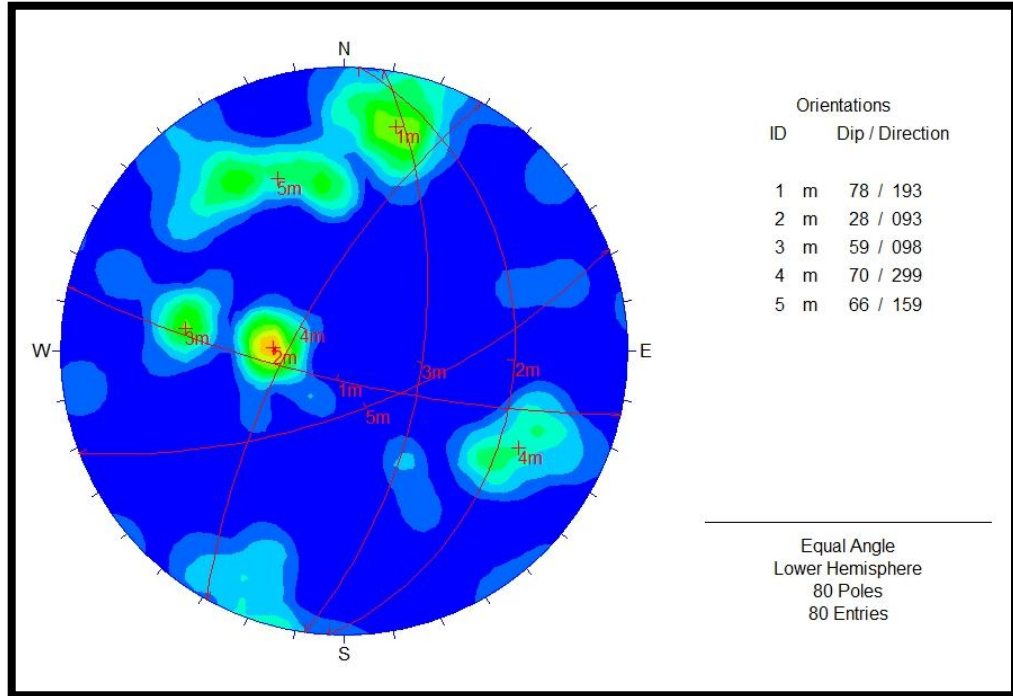
D11



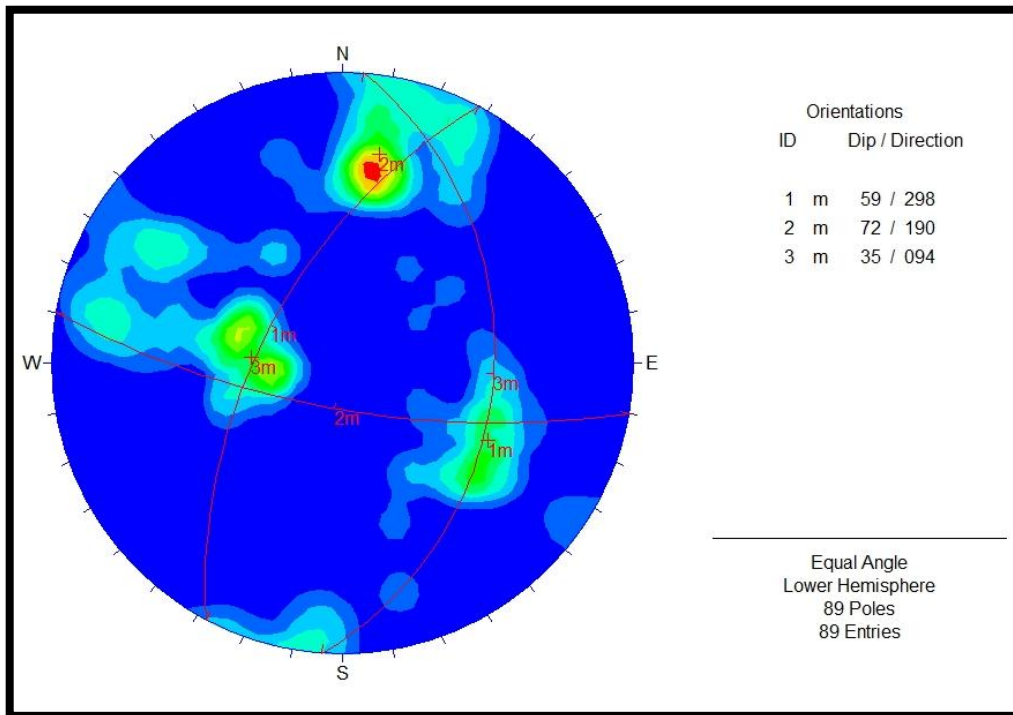
D12



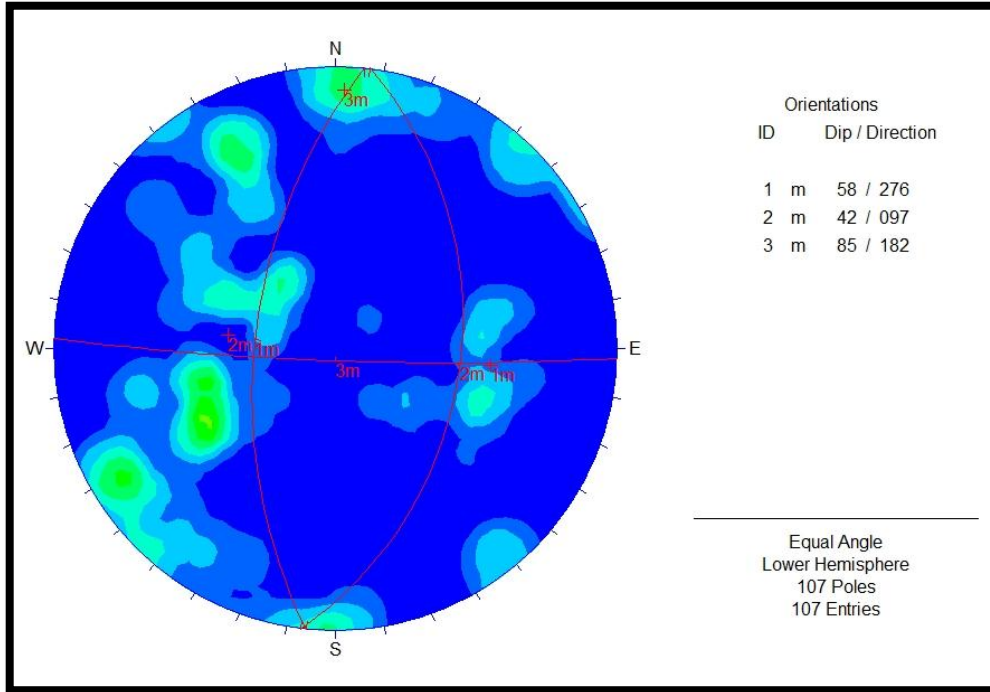
D13



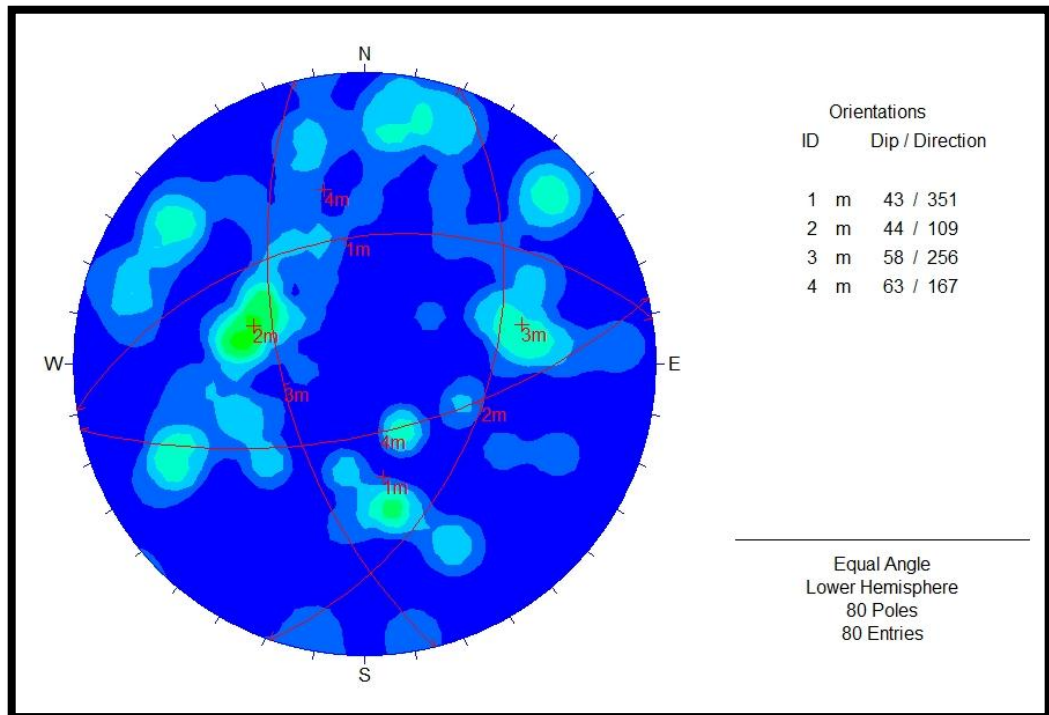
D14



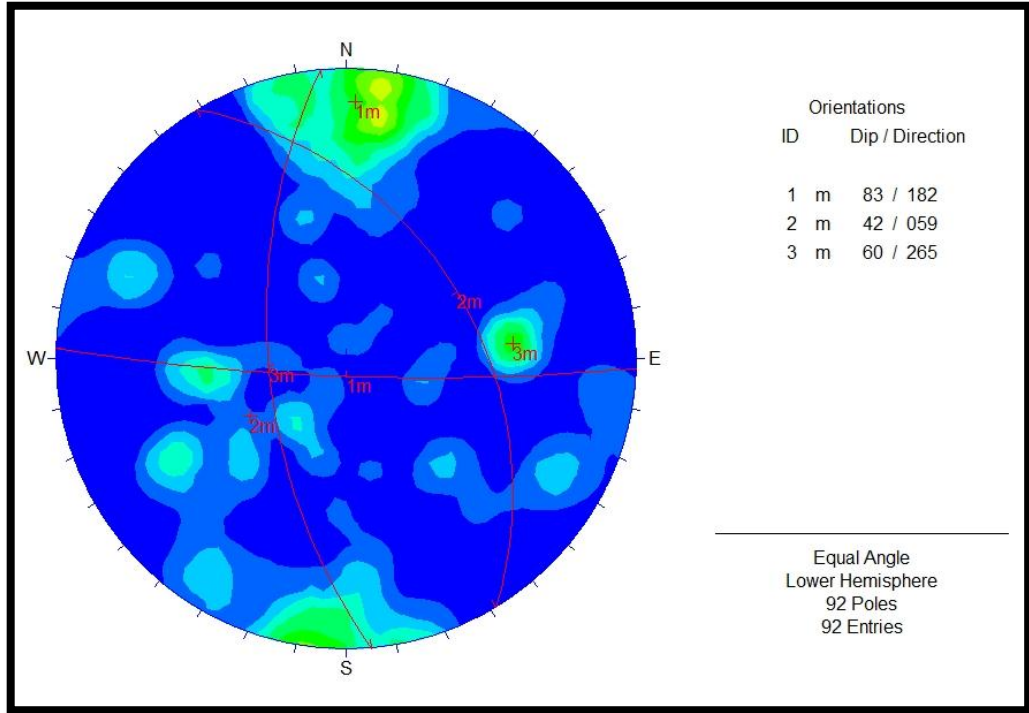
D15



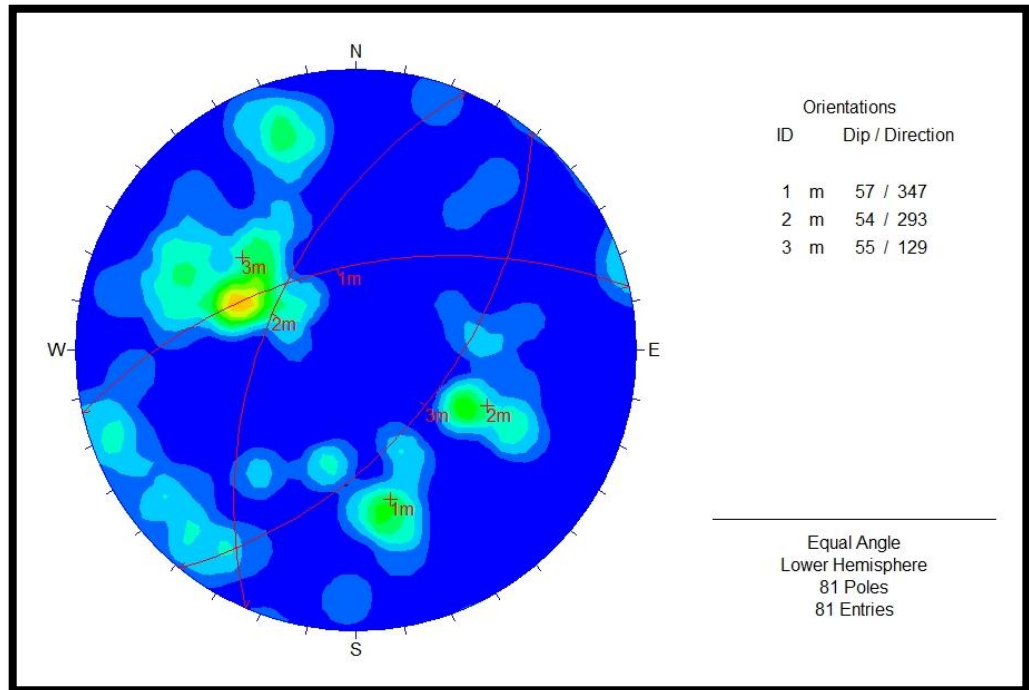
D16



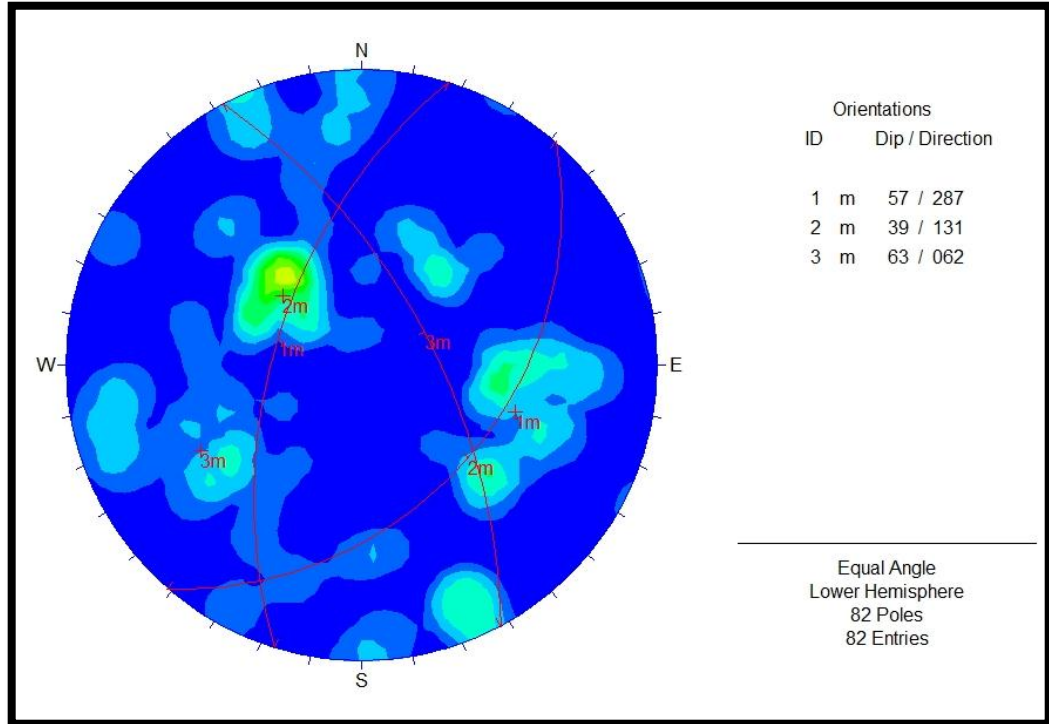
D17



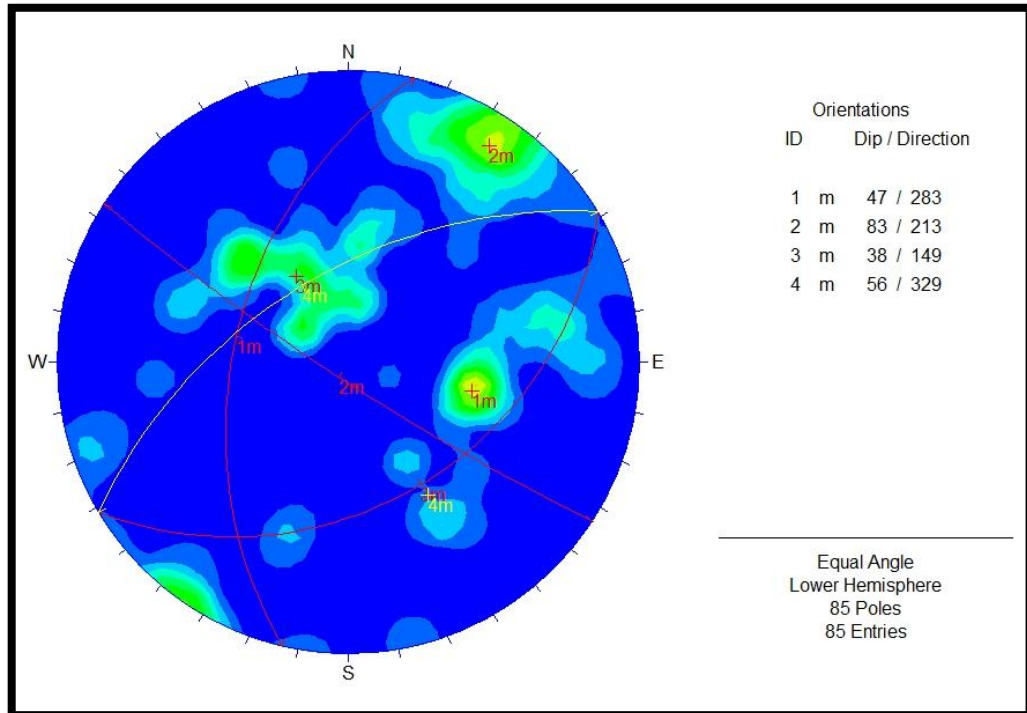
D18



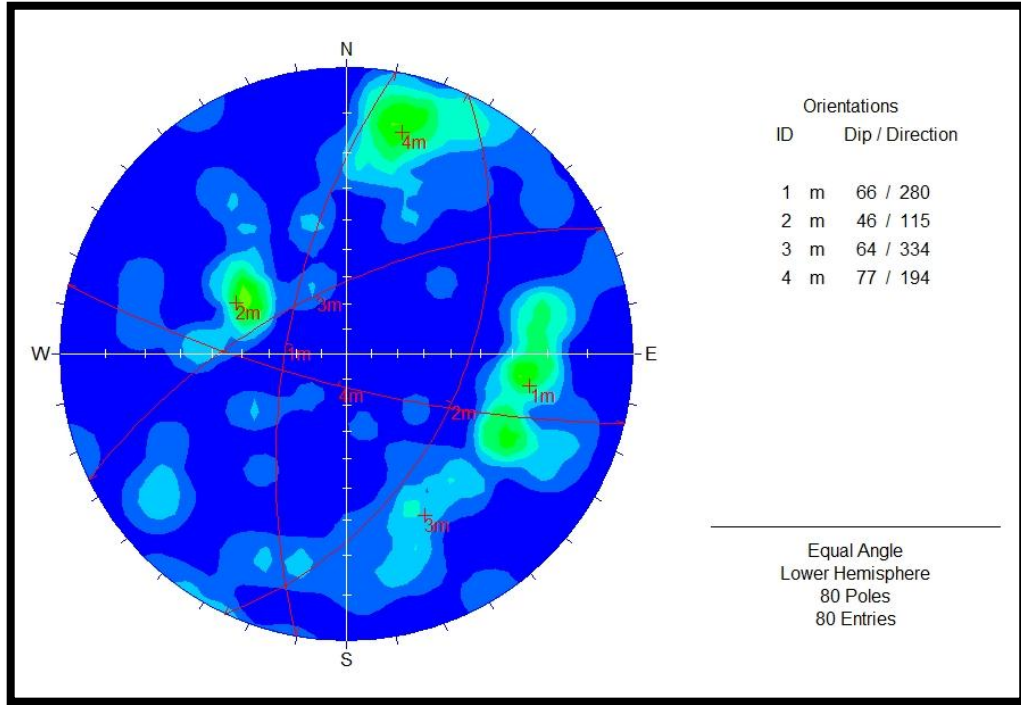
D19



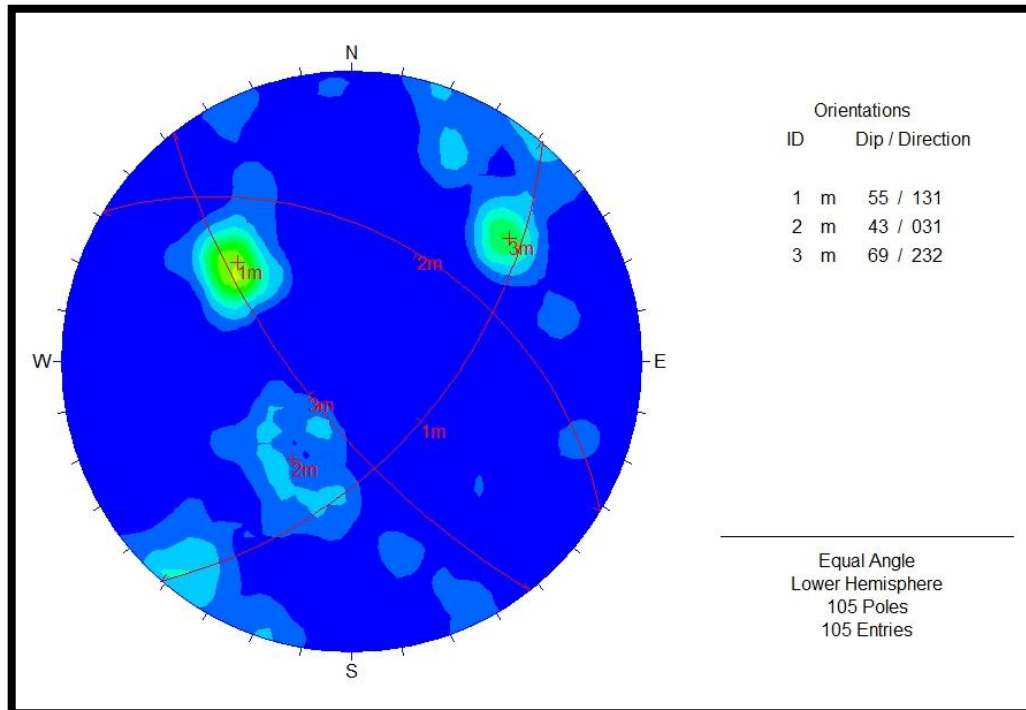
D20



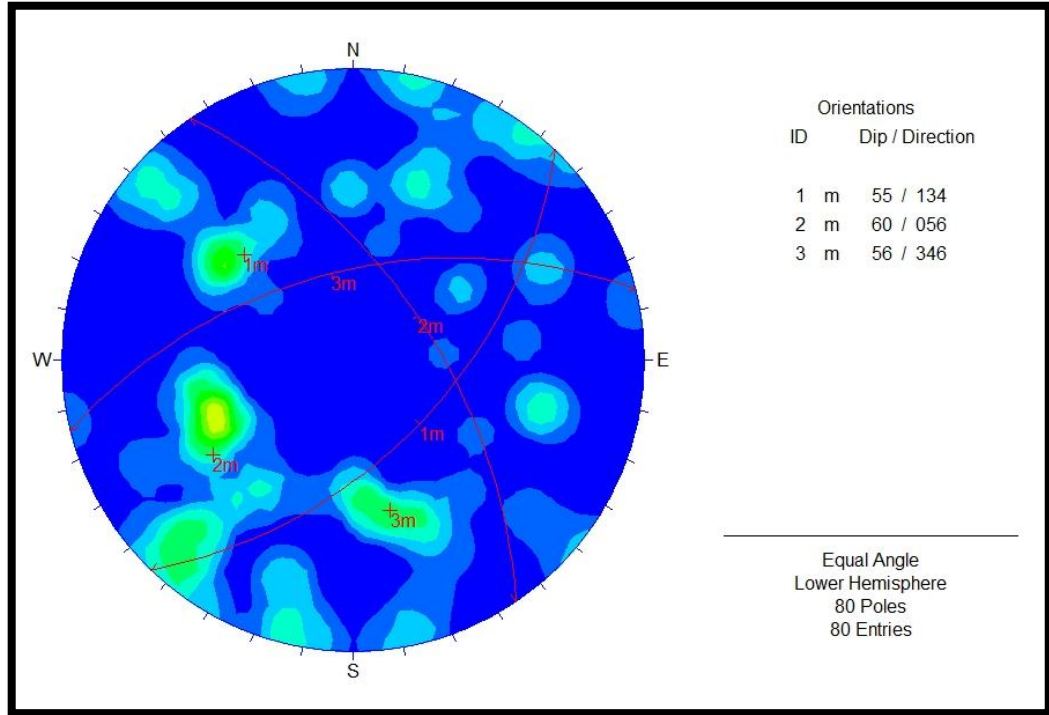
D21



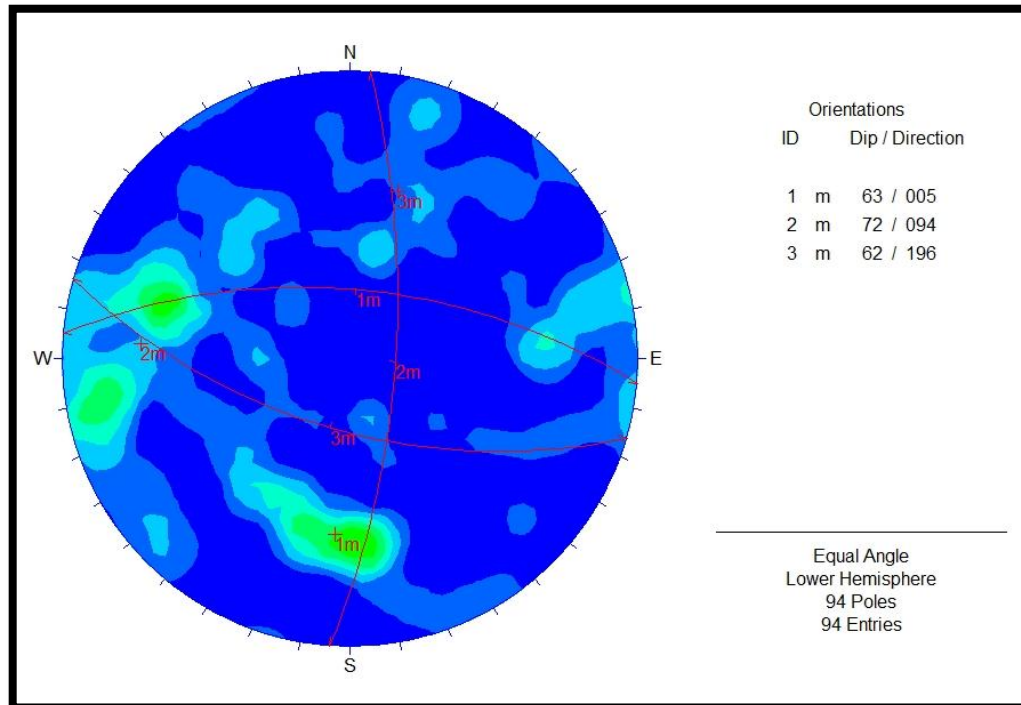
D22



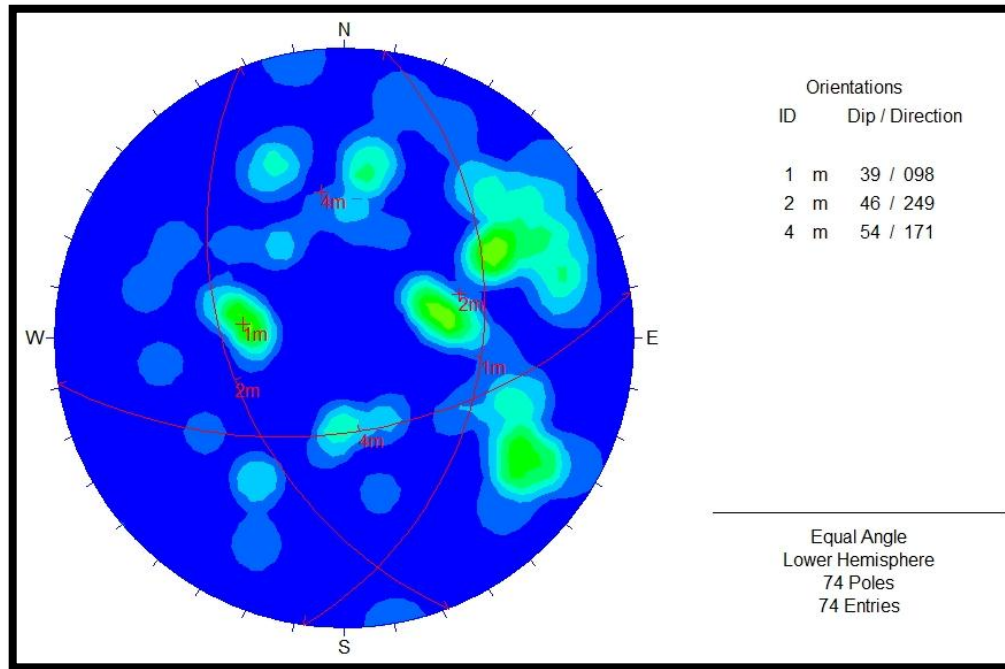
D23



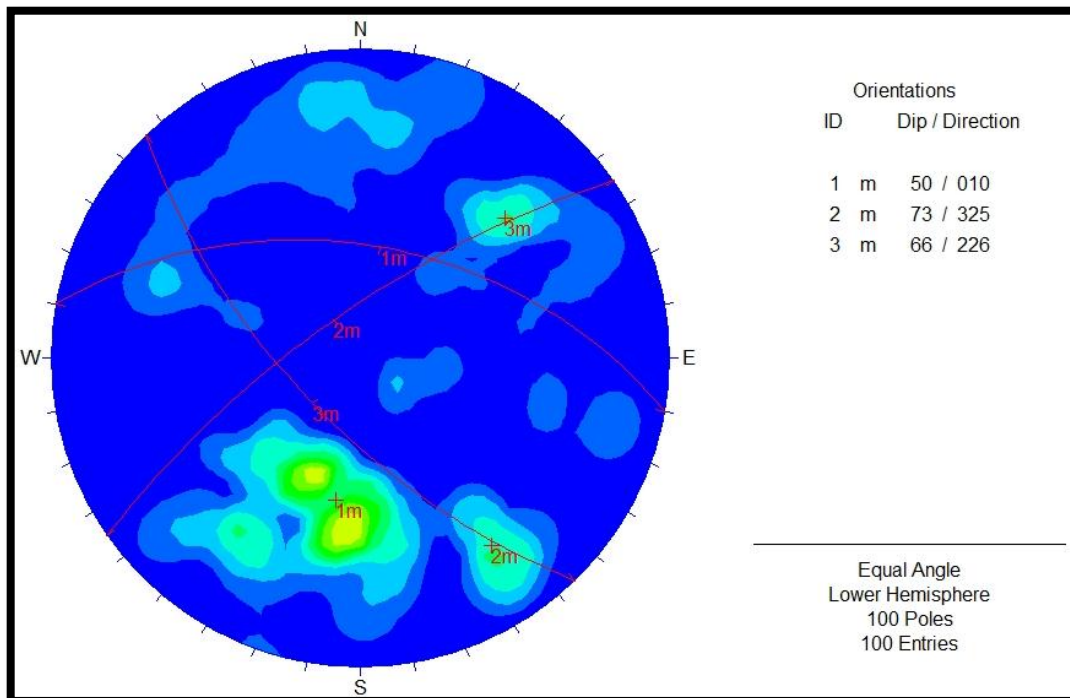
D24



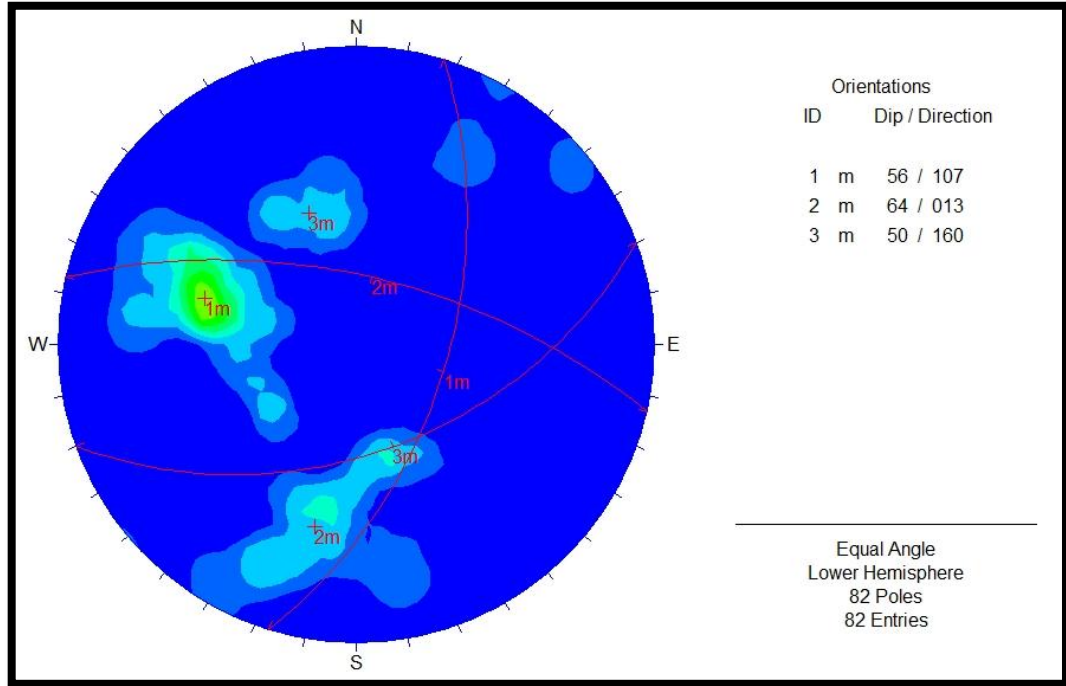
D25



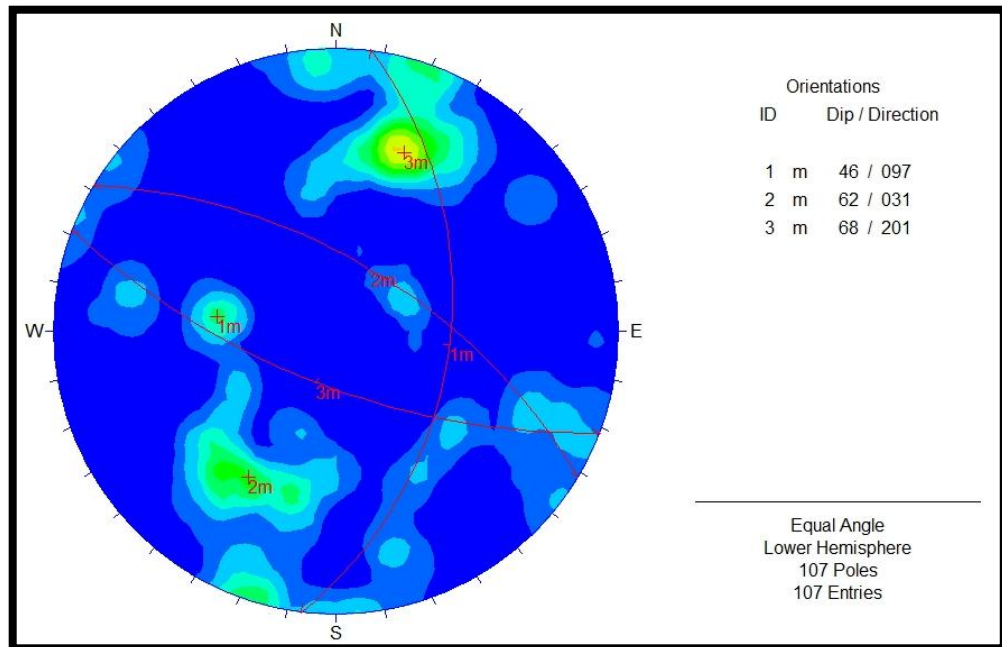
S1



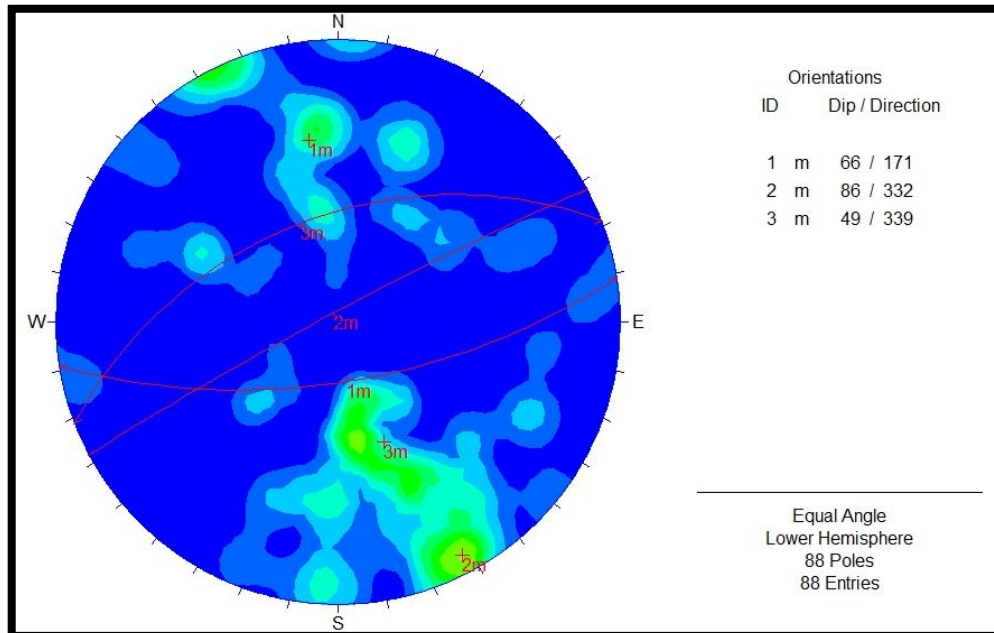
S2



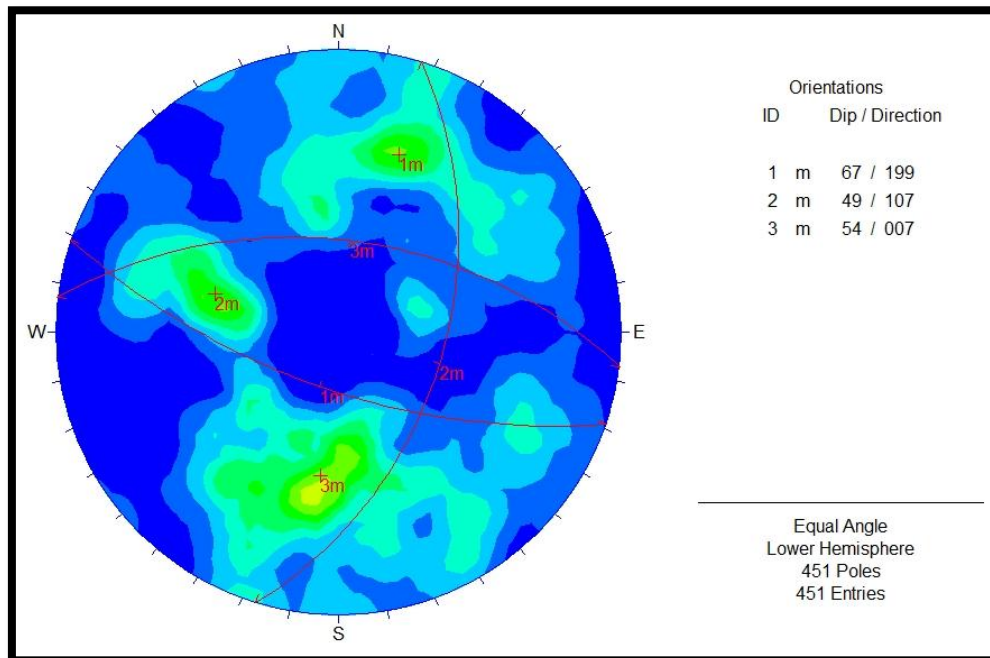
S3



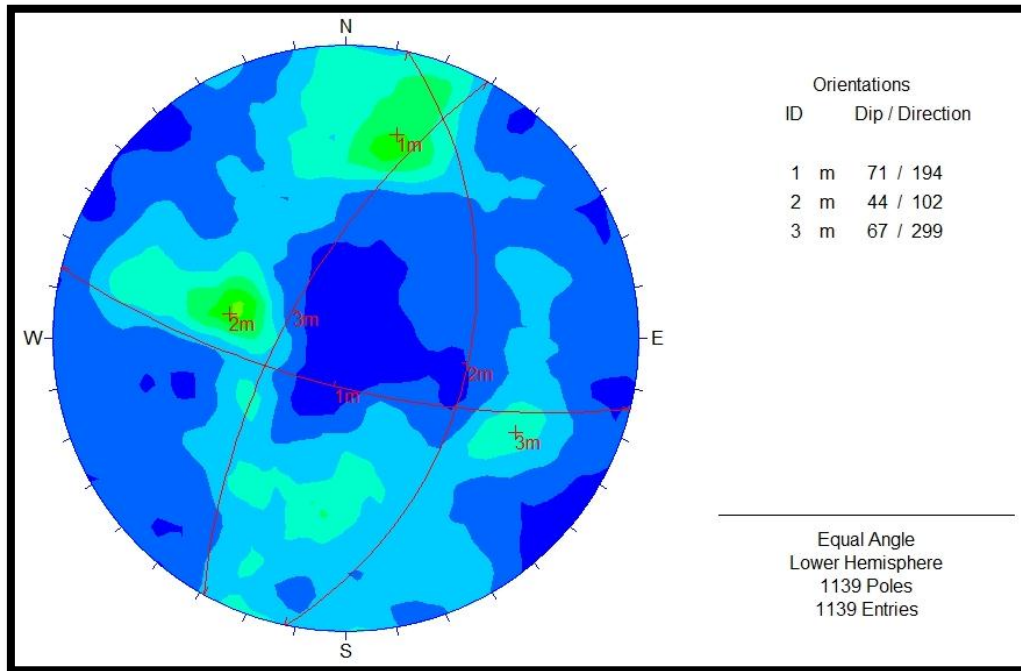
S4



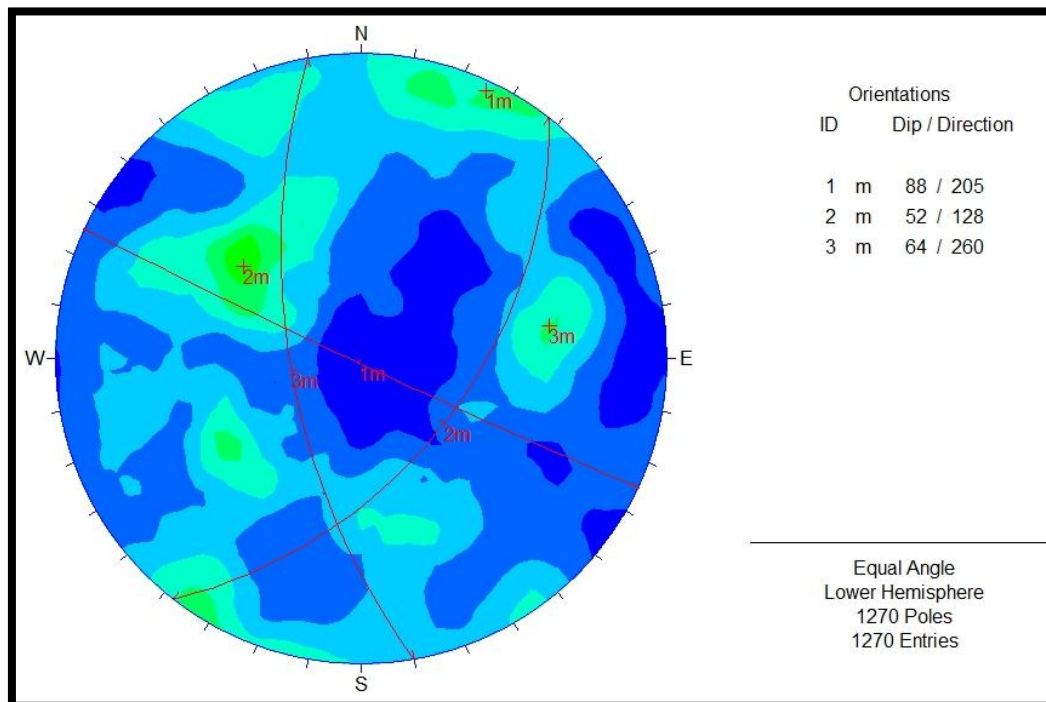
S5



Mapa y familias de la suma de todas las líneas subterráneas S1, S2, S3, S4, S5.



Mapa de densidad de polos Bloque T1.



Mapa de densidad de polos de todo el macizo rocoso de interés (MR).



Anexo D
GRÁFICAS Y TABLAS DE CORRELACIÓN DE DATOS
DE DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DE TESTIGOS VS.
DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA



RecMin - Carles - Edición - [LB170 Litología tabla LITOLOGIA]

General Ventana ?

Verificar Eliminar todas las litologías

Desde	Hasta	Litología
0.00	3.04	OB
3.04	21.33	BG
21.33	27.43	A
27.43	38.00	BG
38.00	40.00	A
40.00	47.24	BG
47.24	48.90	TBX
48.90	99.06	BG
99.06	99.20	HYBX
99.20	116.95	BG
116.95	117.20	TBX
117.20	125.30	BG
125.30	125.50	TBX
125.50	135.90	BG
135.90	137.00	TBX
137.00	147.70	BG
147.70	149.00	A
149.00	157.20	BG
157.20	158.00	TBX
158.00	164.75	BG
164.75	165.00	HYBX
165.00	170.38	BG
170.38	172.20	HYBX
172.20	187.70	BG
187.70	189.05	HYBX
189.05	190.50	TBX
190.50	192.40	BG
192.40	193.40	TBX
193.40	194.40	HYBX
194.40	196.75	TBX
196.75	197.40	BG
197.40	198.40	TBX
198.40	204.80	HYBX
204.80	207.40	BG
207.40	207.50	HYBX
207.50	208.20	BG
208.20	208.95	HYBX
208.95	209.45	BG
209.45	209.65	HYBX
209.65	211.65	TBX
211.65	215.40	BG
215.40	216.30	HYBX
216.30	216.60	TBX
216.60	217.25	BG
217.25	217.60	HYBX
217.60	220.95	BG
220.95	221.20	HYBX
221.20	221.50	TBX
221.50	226.80	BG
226.80	227.05	TBX
227.05	231.15	BG
231.15	232.00	TBX
232.00	235.00	BG
235.00	242.00	TBX
242.00	243.00	BG
243.00	247.00	HYBX
247.00	259.90	BG
259.90	261.60	HYBX
261.60	266.50	BG
266.50	267.60	HYBX
267.60	294.10	BG
294.10	297.40	A
297.40	341.07	BG

Tabla de litologías descritas en el logging geológico del pozo LB 170.

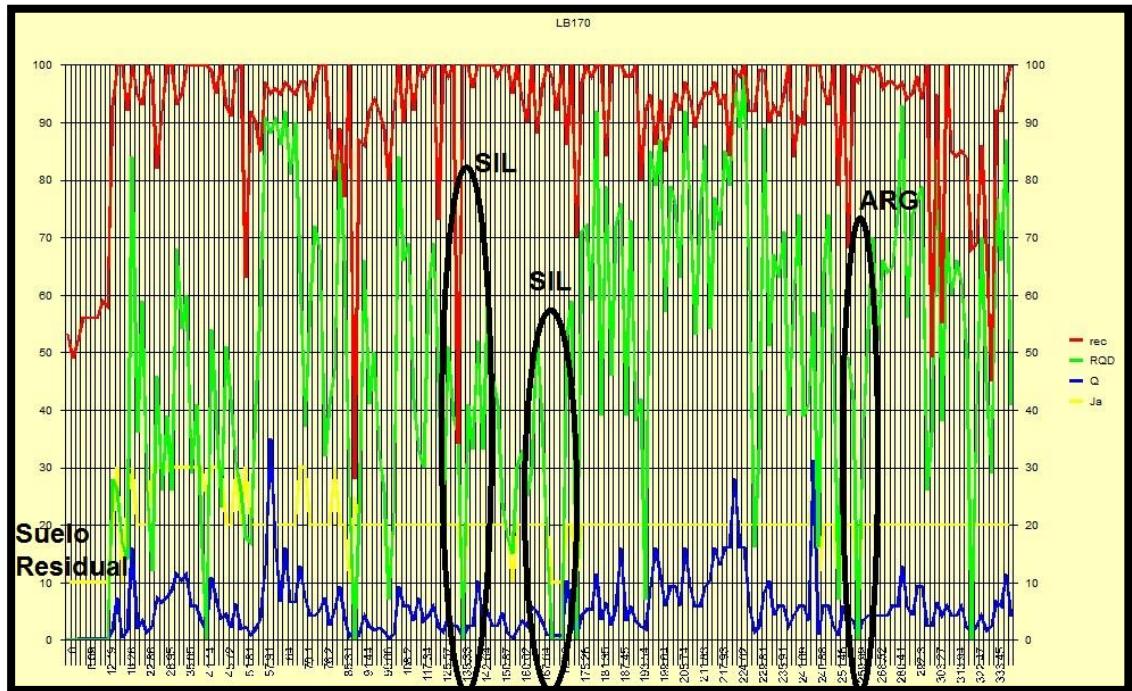
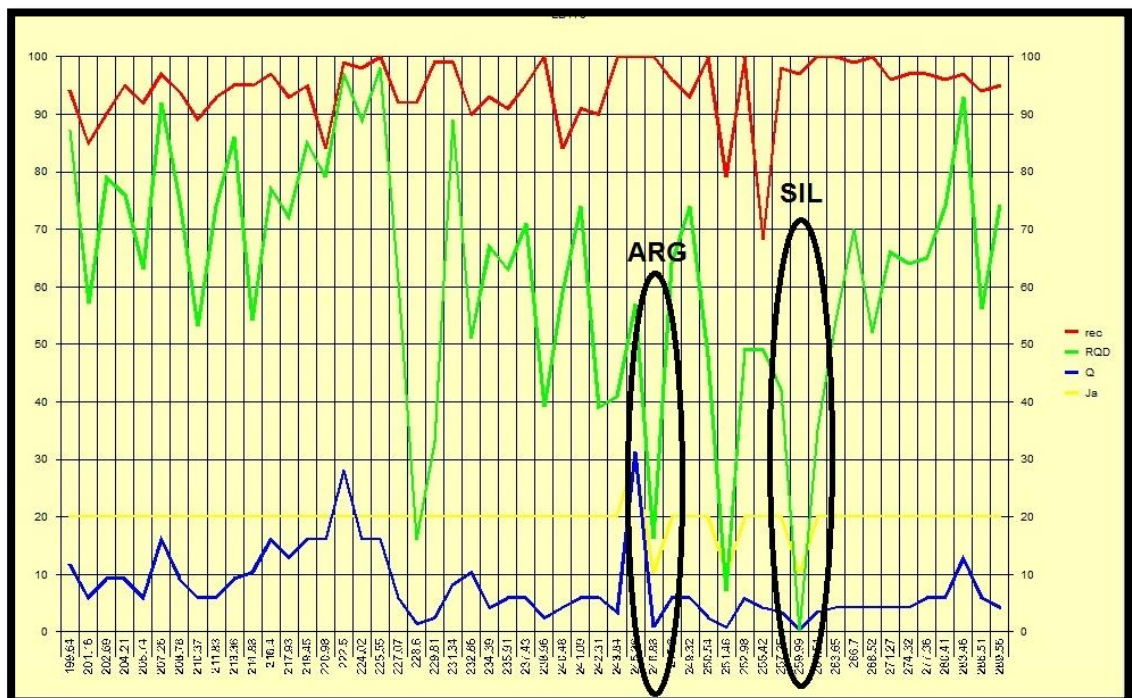


Gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 170.



Zoom del gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 170.



RecMin - Carles - Edición - [LB176 Litología tabla LITOLOGÍA]

General Ventana ?

Verificar Eliminar todas las litologías

Desde	Hasta	Litología
0.00	3.04	OB
3.04	147.00	BG
147.00	148.00	HYBX
148.00	207.75	BG
207.75	207.90	HYBX
207.90	210.30	BG
210.30	210.95	HYBX
210.95	220.10	BG
220.10	220.70	HYBX
220.70	226.10	BG
226.10	226.40	HYBX
226.40	248.10	BG
248.10	251.95	HYBX
251.95	259.00	BG
259.00	265.20	HYBX
265.20	277.60	BG
277.60	281.00	HYBX
281.00	282.00	BG
282.00	283.10	HYBX
283.10	288.40	BG
288.40	291.20	INT
291.20	292.60	HYBX
292.60	295.80	BG
295.80	297.50	HYBX
297.50	300.00	BG
300.00	300.60	HYBX
300.60	302.30	BG
302.30	302.90	HYBX
302.90	303.20	BG
303.20	305.60	HYBX
305.60	306.80	BG
306.80	306.91	HYBX
306.91	307.10	BG
307.10	323.80	HYBX
323.80	324.80	BG
324.80	330.00	HYBX
330.00	333.52	BG
333.52	333.75	HYBX
333.75	360.45	BG
360.45	363.90	HYBX
363.90	364.85	BG
364.85	366.50	HYBX
366.50	367.50	BG
367.50	370.20	HYBX
370.20	370.60	BG
370.60	370.85	TBX
370.85	472.74	BG

Tabla de litologías descritas en el logging geológico del pozo LB 176.

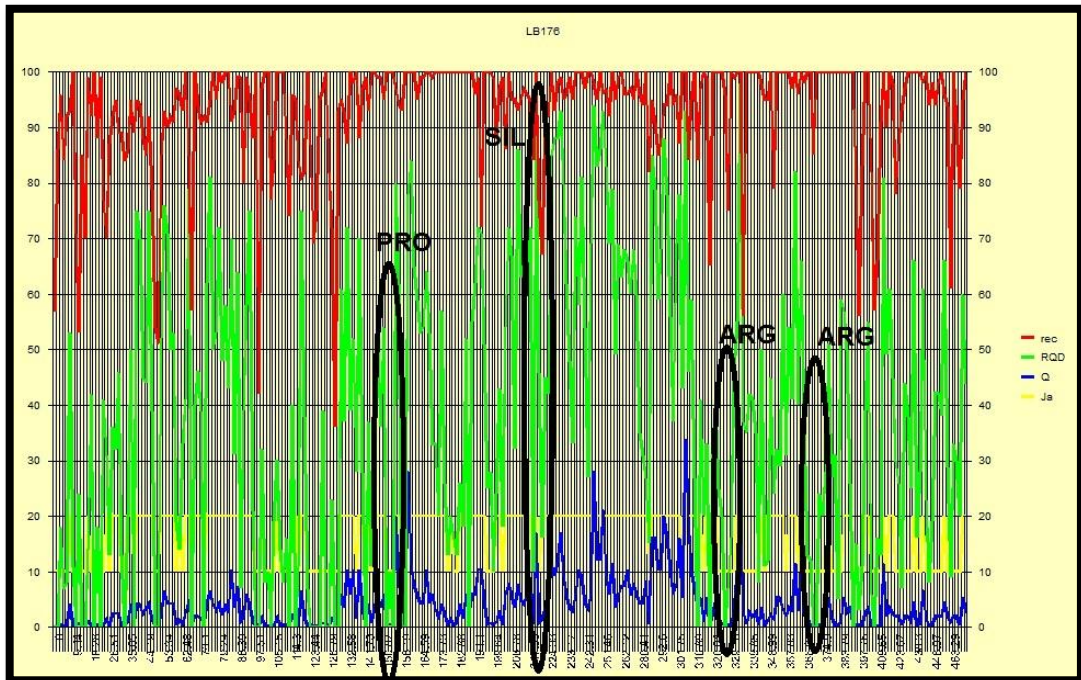
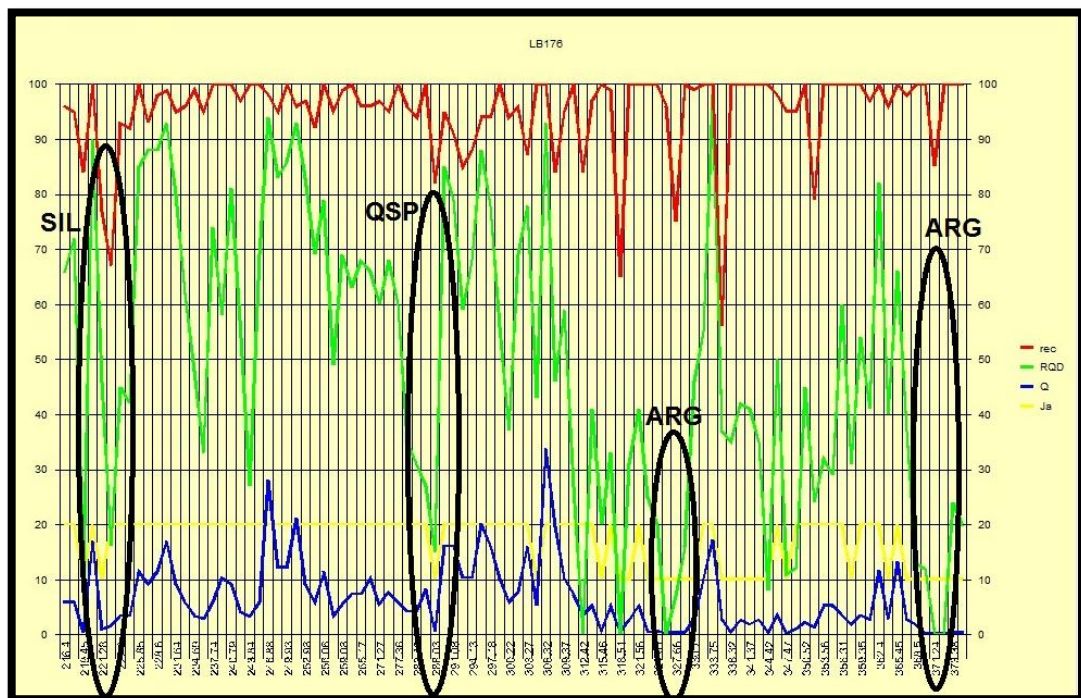


Gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 176.



Zoom del gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 176.



RecMin - Carles - Edición - [LB186 Litología tabla LITOLOGIA]

General Ventana ?

Verificar Eliminar todas las litologías

	Desde	Hasta	Litología
▶	0.00	1.52	OB
	1.52	25.81	BG
	25.81	26.00	HYBX ●
	26.00	30.48	BG
	30.48	30.64	TBX ●
	30.64	33.52	BG
	33.52	34.05	TBX ●
	34.05	117.00	BG
	117.00	117.20	TBX
	117.20	161.65	BG
	161.65	161.75	HYBX ●
	161.75	177.10	BG
	177.10	177.45	INT
	177.45	213.30	BG
	213.30	213.60	HYBX ●
	213.60	216.95	BG
	216.95	217.25	HYBX ●
	217.25	221.19	BG
	221.19	221.95	HYBX ●
	221.95	225.40	BG
	225.40	226.65	HYBX ●●
	226.65	242.80	BG
	242.80	247.00	HYBX ●●●●
	247.00	256.50	BG
	256.50	258.20	TBX ●●
	258.20	277.38	BG
	277.38	278.89	TBX ●●●
	278.89	281.64	BG
	281.64	284.10	HYBX ●●●
	284.10	284.51	BG
	284.51	284.64	HYBX ●
	284.64	290.75	BG
	290.75	297.50	A
	297.50	298.22	BG
	298.22	298.45	TBX ●
	298.45	300.50	BG
	300.50	305.00	HYBX ●●●●
	305.00	307.65	BG
	307.65	308.30	HYBX ●●
	308.30	310.70	BG
	310.70	310.89	VN ●
	310.89	315.00	BG
	315.00	315.46	HYBX ●
	315.46	348.60	BG
	348.60	349.10	A
	349.10	351.43	BG

Tabla de litologías descritas en el logging geológico del pozo LB 186.

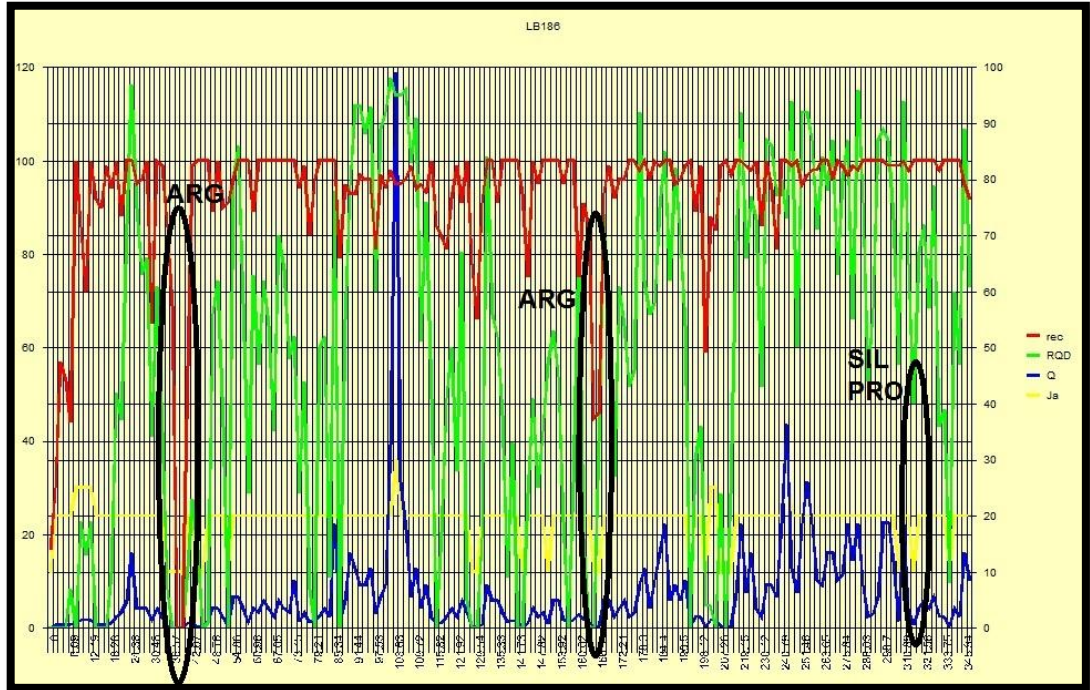
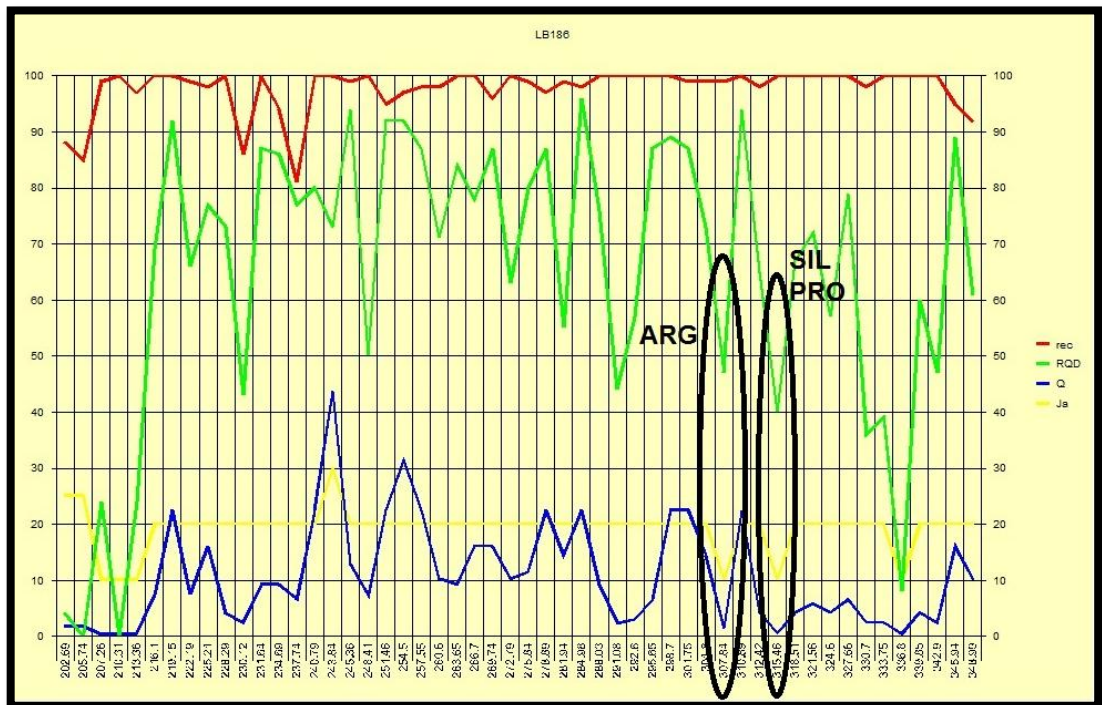


Gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 186.



Zoom del gráfico comparativo de los parámetros y clasificación Q, en la perforación LB 186.



Anexo E
IMÁGENES E INFORMES DE MODELOS RECMIN Y
UNWEDGE