

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS TALUDES
ROCOSOS DEL COSTADO OCCIDENTAL DE LA VÍA BUCARAMANGA-
BARRANCABERMEJA EN EL SECTOR DEL PEAJE AEROPUERTO
PALONEGRO-MUNICIPIO DE SAN JUAN DE GIRÓN EN EL TRAMO
COMPRENDIDO DESDE KM 64+350 HASTA EL KM 68+050**

**JORGE IVÁN DUARTE MARÍN
OLGUER IVÁN ROA VIOLA**

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

2016

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS TALUDES
ROCOSOS DEL COSTADO OCCIDENTAL DE LA VÍA BUCARAMANGA-
BARRANCABERMEJA EN EL SECTOR DEL PEAJE AEROPUERTO
PALONEGRO-MUNICIPIO DE SAN JUAN DE GIRÓN EN EL TRAMO
COMPRENDIDO DESDE KM 64+350 HASTA EL KM 68+050**

**JORGE IVÁN DUARTE MARÍN
OLGUER IVAN ROA VIOLA**

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo

**Director:
LUIS EDUARDO MORENO TORRES
Ingeniero Civil**

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

2016

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por guiarme y permitirme concluir esta etapa, que con mucho esfuerzo y dedicación pude completar, y con ello poder seguir sobre el sendero del conocimiento y el trabajo en equipo, para cosechar buenos momentos y éxitos venideros en la siguiente etapa de mi vida.

Dedico este proyecto de grado a mis padres Iván y Glenys, al igual que a mi hermana Estefanía que siempre estuvieron conmigo apoyándome en todo momento desde el inicio de mi carrera, que con su amor y experiencia me motivaron a seguir adelante.

También a mi tía Belkís, mi tía Yaneth y Nataly ya que ellas me acompañaron en este proceso de aprendizaje, donde depositaron su confianza y ayuda, para aportarme confort y bienestar y así llevar a cabo esta ilusión.

Finalmente a mis compañeros, Samuel, Edwin, Jesús, Jaime, Diego, Olguer, John, Paola, Jaidith, Alejandra, Laura y Claudia que gracias a su amistad me impulsaron más allá de mis capacidades para poder desarrollar y completar este proyecto.

JORGE IVÁN

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por guiarme y permitirme concluir esta etapa de mi vida, que con mucho esfuerzo y dedicación pude completar y con ello poder seguir sobre el camino del conocimiento y de la vida.

Dedico este proyecto de grado a mis padres Holguer Roa y Smith Viola que siempre estuvieron conmigo apoyándome en todo momento desde el inicio de mi carrera, que con su amor y experiencia me motivaron a seguir adelante.

También a mi novia Barbara Jaimes por su apoyo incondicional y constante ayuda en este proceso de aprendizaje, donde deposito su confianza, para aportarme confort y bienestar y así llevar a cabo esta ilusión.

Finalmente a mis compañeros, Samuel, Edwin, Diego, Jorge y John, que gracias a su amistad me impulsaron más allá de mis capacidades para poder desarrollar y completar este proyecto.

Olguer Iván

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Industrial de Santander** por abrirnos sus puertas y formarnos como profesionales, íntegros, responsables y respetuosos.

A la **Escuela de Geología**, claustro de profesores y demás trabajadores, por su atención y prestación de servicios.

Al profesor **Luis Alberto Moreno Torres** por habernos otorgado la oportunidad de trabajar en este proyecto y por la confianza que nos brindó en todo momento en el desarrollo de esta etapa.

A **Diego Hernández, Samuel Salcedo, Edwin Díaz, Jhon Villabona** por su acompañamiento en todo momento y su apoyo incondicional en todo el trayecto de este arduo trabajo, que sin su ayuda no habría sido posible completar a tiempo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.1 OBJETIVOS	23
1.1.1 Objetivo general	23
1.1.2 Objetivos específicos	23
1.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	23
1.2.1 Fase I. Recopilación de Información Bibliográfica y Elaboración de un Cronograma de Trabajo	23
1.2.2 Fase II. Reconocimiento de la Zona de Estudio y recolección de datos	24
1.2.3 Fase III. Selección de Información Estructural y análisis de datos	24
1.2.4 Fase IV. Análisis de resultados	24
1.2.5 Fase V. Edición del Informe Final	25
2. GENERALIDAD DEL AREA DE ESTUDIO	26
2.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	26
3. ESTADO DEL ARTE	28
3.1 GEOLOGIA DE LA ZONA	28
3.1.1 Unidades Litológicas	29
3.1.1 Formación Girón. (Jg).	29
3.1.2 Formación Jordán. (Jj).	30
3.1.3 Depósitos Aluviales	31
3.1.3.1 Depósitos Aluviales de Terrazas Medias (Qal2):	31
3.1.3.2 Depósitos Aluviales de Terrazas Bajas (Qal1):	31

3.1.3.3 Depósitos Coluviales o de Ladera (Ql):	32
3.1.3.4 Depósitos Aluviales de Cauce y Llanura de Inundación (Qal):	32
3.1.4 Sistema de falla del Suarez	32
3.2 ASPECTOS INFLUYENTES	33
3.2.1 Estructuras discontinuas. Hay dos tipos básicos de estructuras discontinuas:	33
3.2.2 Diaclasas	34
3.2.3 Fallas.	35
3.2.4 Meteorización	35
3.3 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS GEOMECÁNICO	36
3.4 TIPO DE FALLAS EN TALUDES ROCOSOS ² .	44
3.4.1 Falla por rotura planar	44
3.4.2 Falla por rotura en cuña	46
3.4.3 Falla por rotura con vuelco o volcamiento	47
4. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS TALUDES ROCOSOS	48
4.1 METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS	48
4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL AFLORAMIENTO	49
4.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL TALUD	50
4.4 DESCRIPCIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES	50
4.4.1 Orientación de las discontinuidades	51
4.4.2 Espaciado en las discontinuidades	51
4.4.3 Continuidad o persistencia en las discontinuidades	53
4.4.4 Abertura de las discontinuidades	54
4.4.5 Rugosidad en las discontinuidades	55
4.4.6 Relleno en las discontinuidades	57
4.4.7 Resistencia de las paredes de la discontinuidad	58
4.5 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL TALUD ROCOSO	60

4.5.1 Resistencia del material intacto (Ensayo de carga puntual o compresión simple).	60
4.5.2 Medición del RQD (Rock Quality Designation).	62
4.5.3 Estado de las discontinuidades	63
4.5.4 Condición de las discontinuidades	64
4.5.5 Agua freática	65
4.5.6 Clasificación RMR de Bieniawski de 1989	65
4.6 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS TALUDES SMR (ROMANO, 1997)	67
5. ANALISIS DE LOS ESFUERZOS EN EL MACIZO ROCOSO POR MEDIO DEL SOFTWARE LIBRE WIN-TENSOR.	71
5.1. RESULTADOS DEL SOFTWARE LIBRE WIN-TENSOR.	71
6. CONCLUSIONES	85
7. RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFIA	87
ANEXOS	89

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del área del presente estudio, ubicado en el municipio de San Juan de Girón vía Barrancabermeja - peaje del aeropuerto Palonegro.	26
Figura 2. Localización del área de estudio.	27
Figura 3. Mapa geológico regional entre Girón y Lebrija.	29
Figura 4. Tipos de fracturas según Anderson. Modo I: Abertura, Modo II: Deslizamiento, Modo III: Desgarramiento. Las fallas son grietas del modo II o III, mientras que las diaclasas son grietas del modo I.	34
Figura 5. Ábaco utilizado para realizar la resistencia uniaxial a compresión, determinada tomando como punto de partida los rebotes registrados en el martillo con su respectiva inclinación. Se determina la densidad de la muestra en el laboratorio para luego realizar la intersección con los datos del martillo obteniendo así la resistencia uniaxial a compresión.	39
Figura 6. Ecuación para calcular el valor teórico de RQD.	41
Figura 7. Ecuación para encontrar el valor del R.M.R.	41
Figura 8. Ecuación para calcular el índice SMR.	42
Figura 9. Formula de F1: α y β son los valores del rumbo de la discontinuidad y del talud respectivamente.	43
Figura 10. Formula de F2: β es el buzamiento de la discontinuidad. F2 vale 1,00 para las roturas por vuelco.	43
Figura 11. Esquemas de métodos de estabilidad en Taludes por rotura planar. a). Representación bidimensional de falla por rotura planar. b). Proyección semiesférica equiareal de Schmidt de falla por rotura planar.	45
Figura 12. Esquemas de métodos de estabilidad en Taludes. Proyección semiesférica equiareal de Schmidt de falla por rotura en cuña.	46

Figura 13. Esquemas de métodos de estabilidad en Taludes. Proyección semiesférica equiareal de Schmidt de falla por rotura con vuelco.	47
Figura 14. Foto del Afloramiento No. 3 donde se observa la división en las zonas.	49
Figura 15. Toma de datos estructurales de rumbo y buzamiento.	50
Figura 16. Ejemplo del espaciado de las discontinuidades en el afloramiento No.3.	52
Figura 17. Ejemplo de la continuidad de las discontinuidades.	53
Figura 18. Ejemplo de medición de las aberturas de las discontinuidades por medio de un calibrador.	55
Figura 19. Ejemplo de la rugosidad – ondulación de las discontinuidades mediante la comparación visual con los perfiles estándar de rugosidad sacados .	56
Figura 20. Ejemplo de la rugosidad de las discontinuidades.	58
Figura 21. Medición de la resistencia de las paredes de la discontinuidad en el afloramiento No 3 usando el martillo Schmidt.	59
Figura 22. Ábaco usado para determinar la resistencia uniaxial a compresión dependiendo de la resistencia del martillo Schmidt, la densidad de la muestra y la posición del martillo a la hora de la medida.	61
Figura 23. Diagrama de rosetas mostrando las direcciones de las familias de diaclasas y la dirección del talud.	64
Figura 24. Ecuación para encontrar RMR con las áreas de cada zona.	66
Figura 25. Tipo de rotura por zona del afloramiento No.3 trabajad mediante el programa Dips.	68
Figura 26. Afloramiento 1. a. Datos estructurales en Stereonet. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). b. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, en los que se evidencian los 14 rumbos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). c. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, donde se evidencian los 14 buzamientos de las 3 familias de Diaclasas. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). d.	

Circulo de MOHR, en Win-Tensor. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). e. Conclusión de Resultados, en Win-Tensor. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). 72

Figura 27. Afloramiento 2. a. Datos estructurales en Stereonet, en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas en los que se evidencian los 20 rumbos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas donde se evidencian los 20 buzamientos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y Modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). 73

Figura 28. Afloramiento 3. a. Datos estructurales en Stereonet, en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, en el que se evidencian los 16 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas donde se evidencian los 16 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). 75

Figura 29. Afloramiento 4A1I. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 6 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, se evidencian los 6 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). 76

Figura 30. Afloramiento 4A3I. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 6 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, donde se evidencian los 6 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de

MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).	78
Figura 31. Afloramiento 4A5I. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Datos del afloramiento 4 A3. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, en los que se evidencian los 5 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas se evidencian los 5 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).	79
Figura 32. Afloramiento 5. a. Datos estructurales en Stereonet del afloramiento 5. En él se muestran los planos y sus respectivos polos. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 11 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 11 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).	81
Figura 33. Afloramiento 6. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 10 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Datos del afloramiento 6. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 10 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).	82
Figura 34. Mapa del análisis geomecánico. Se observa el estado de los taludes junto con los esfuerzos que está actuando sobre estos.	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción del grado de meteorización para los macizos rocosos.	36
Tabla 2. Clasificación RMR para macizo Rcoso (Bieniawski, 1989).	42
Tabla 3. Clasificación SMR de macizos rocosos (Romano, 1988).	44
Tabla 4. Datos estructurales del afloramiento No. 3.	51
Tabla 5. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades	52
Tabla 6. Datos del espaciamiento del afloramiento No.3.	52
Tabla 7. Descripción de la continuidad de las discontinuidades.	53
Tabla 8. Datos de la continuidad en las discontinuidades del afloramiento No.3.	54
Tabla 9. Descripción de la abertura de las discontinuidades.	54
Tabla 10. Datos de la abertura en las discontinuidades del afloramiento No.3.	55
Tabla 11. Descripción de la abertura de las discontinuidades.	56
Tabla 12. Datos de rugosidad en las discontinuidades del afloramiento No.3.	57
Tabla 13. Descripción de la abertura de las discontinuidades.	57
Tabla 14. Datos de rugosidad en las discontinuidades del afloramiento No.3.	58
Tabla 15. Datos de resistencia de las discontinuidades del afloramiento No. 3.	59
Tabla 16. Calculo de Resistencia por zonas y puntuación para el afloramiento No. 3.	61
Tabla 17. Promedio de espaciamiento y resultado de.λ.	62
Tabla 18. Resultados del RQD teórico y puntuación para el afloramiento No.3.	63
Tabla 19. Corrección por orientación de las discontinuidades de acuerdo al diagrama de rosetas.	64
Tabla 20. Sumatoria de las condiciones de las discontinuidades.	65
Tabla 21. Clasificación según la presencia de aguas freáticas.	65
Tabla 22. Áreas de cada una de las zonas del afloramiento No. 3.	66
Tabla 23. Puntuación total para el cálculo de RMR.	66

Tabla 24. Clasificación de acuerdo a la calidad del talud.	67
Tabla 25. Cálculo del SMR en el afloramiento No.3	69
Tabla 26. Resultado de clasificación RQD, RMR y SMR para cada uno de los afloramientos trabajados.	70

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS TALUDES ROCOSOS DEL COSTADO OCCIDENTAL DE LA VÍA BUCARAMANGA-BARRANCABERMEJA EN EL SECTOR DEL PEAJE AEROPUERTO PALONEGRO-MUNICIPIO DE SAN JUAN DE GIRÓN EN EL TRAMO COMPRENDIDO DESDE KM 64+350 HASTA EL KM 68+050*

AUTOR: JORGE IVAN DUARTE MARIN
OLGUER IVAN ROA VIOLA**

PALABRAS CLAVES: Talud, Macizo Rocoso, Estabilidad de Taludes, RMR, SMR.

CONTENIDO: El presente proyecto de grado en la modalidad de investigación, presenta el análisis de estabilidad del talud rocoso de la vía Bucaramanga – Barrancabermeja en el sector del peaje aeropuerto Palonegro – Municipio de San Juan de Girón en el tramo comprendido desde Km 64+350 hasta el Km 68+050 y En base a este análisis de estabilidad de taludes se pretende establecer las y se proponen posibles soluciones a los problemas específicos.

Para hacer una correcta evaluación de la problemática de la zona en estudio se ha hecho una recopilación de información bibliográfica, El análisis se desarrolló con base en la caracterización geológica, geomorfológica y topográfica, con base en información secundaria y trabajo de campo para determinar mediante el estudio de las que incluyo determinación de familias de diaclasas, caracterizaciones litológicas y ensayos básicos de la mecánica de rocas para establecer los parámetros Geomecánicos y Geotécnicos del talud rocoso; actividades que permitieron clasificar los taludes. Utilizando el software de uso libre como *Win-Tensor y Dips*, que permite darle una interpretación a los resultados obtenidos. Una vez Concluido el análisis de los mecanismos de falla de la zona en estudio se procede a realizar un análisis comparativo de las posibles alternativas de solución para lograr una correcta estabilización del talud rocoso.

De esta manera se pudo realizar un análisis comparativo de cada una de las soluciones planteadas y determinar en base a parámetros técnicos, la solución más adecuada para la zona en estudio.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Físico Químicas. Escuela de Geología. Director: Luis Eduardo Moreno. Ingeniero Civil UIS

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF THE ROCKY SLOPE OF THE WEST SIDE OF THE ROAD BUCARAMANGA-BARRANCABERMEJA IN THE AREA OF THE PALONEGRO AIRPORT- SAN JUAN DE GIRÓN MUNICIPALITY IN THE SECTION FROM KM 64 + 350 TO KM 68 + 050*

AUTHOR: JORGE IVAN DUARTE MARIN
OLGUER IVAN ROA VIOLA**

KEYWORDS: Slope, Rocky Mountain, Slope Stability, Topography, Geology.

CONTENT: This graduation project has a form of research, it aims to do an analysis of the rocky slope stability of the road Bucaramanga-Barrancabermeja in the area of the Palonegro airport- San Juan de Girón municipality in the section from km 64 + 350 to km 68 + 050. Based on this slope stability analysis it is intended to establish the possible solutions to the specific problems of it.

To make an accurate assessment of the problem of the study area a collection of geological, geomorphological and topographical literature has been done, which allowed the classification of the studied slopes. In order to achieve this goal, freely usable software as *Win-Tensor* and *Dips* have been used, which allowed us to give an interpretation of the obtained results; also a field work has been done to determine through the study of joint families, lithological characterizations and basic rock mechanics tests, the Geomechanical and Geotechnical parameters of the rocky slope.

Once the analysis of the problems of the study area is completed, we proceed to do an analysis of the possible solutions that can be applied for a proper stabilization of the rocky slope, as well as interception work and surface and groundwater control.

In this way it was possible to make a comparative analysis of each of the proposed solutions and determine based on technical parameters, which could be the best solution for the study area.

* Draft Grade

** Faculty of Engineering Physicochemical. School of Geology. Director: Ing. Luis A. Moreno Torres

INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo urbano de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, generan la necesidad apremiante de contar con vías apropiadas para satisfacer los requerimientos de transporte de personas y carga; esto ha desencadenado la construcción y ampliación de nuevas vías para satisfacer dichas necesidades.

La vía que comunica a Bucaramanga con Barrancabermeja, en el sector del Municipio de San Juan de Girón – Aeropuerto Palonegro fue intervenida para ampliación a doble calzada generándose grandes cortes a las laderas existentes junto a la vía, generando con la intervención de taludes de alta pendiente que necesitan de un análisis de estabilidad y medidas de control como es el caso de los taludes rocosos del tramo comprendido desde el **KM 64+350 hasta el KM 68+050**; que es el objeto del presente estudio.

De acuerdo a los aspectos citados anteriormente, se hace necesario determinar las causas de la posible inestabilidad y los factores que afecten la seguridad, como cambios en la geometría, composición y variaciones de saturación; por esto a continuación se desarrollará un análisis con ayuda del uso de software, caracterizaciones geológicas, geotécnicas y un arduo trabajo de campo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los taludes rocosos presentes en la vía Barrancabermeja-Bucaramanga en el sector peaje del Aeropuerto Palonegro – casco urbano de San Juan de Girón en el tramo comprendido desde Km 64+350 hasta el Km 68+050 fueron expuestos en el año 2005 a las condiciones por la intervención de la ampliación de la vía de calzada sencilla a una en doble calzada mediante un corte profundo. En el talud occidental de la Mesa de Lebrija, afectado por fallamiento y procesos morfodinámicos tales como erosión y movimientos en masas (deslizamientos, desprendimientos y caídas de rocas, detritos y suelos principalmente), que afectan directamente este macizo rocoso.

Dentro de las afectaciones generadas por los procesos morfodinámicos podemos mencionar el daño en la infraestructura vial y eléctrica, afectación de actividades económicas, afectaciones ambientales y en la seguridad y salud de las personas, lo cual representa adicionalmente pérdidas económicas.

El proyecto se basa en el estudio del comportamiento mecánico de los taludes rocosos, fundamentados en la necesidad de aportar metodología de estudio en la rama de la geotecnia que ayuden a interpretar y entender el comportamiento de los taludes por medio de herramientas computacionales.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

- Realizar un análisis del comportamiento mecánico de los taludes rocosos en la vía Bucaramanga-Barrancabermeja en el tramo comprendido entre el peaje Aeropuerto Palonegro-Municipio de Girón en el tramo comprendido desde Km 64+350 hasta el Km 68+050.

1.1.2 Objetivos específicos

- Medir los parámetros que controlan el comportamiento mecánico de los taludes rocosos en el área de estudio.
- Realizar la caracterización mecánica de los macizos rocosos por medio de la clasificación RMR¹ y el ajuste realizado para taludes utilizando la clasificación SMR.²
- Realizar un análisis de los esfuerzos actuantes sobre los taludes rocosos por medio del programa Win Tensor.

1.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

1.2.1 Fase I. Recopilación de Información Bibliográfica y Elaboración de un Cronograma de Trabajo. Recopilación bibliográfica de artículos y estudios previos relacionados con el objetivo de la investigación, así como consulta de mapas y estudios geotécnicos y geológicos realizados con anterioridad en la zona; Dichos recursos bibliográficos fueron tomados de las bases de datos de la

¹ BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. In exploration for rock engineering, proc. Of the symp. 1976 Pages 97-106

² GONZALEZ DE VALLEJO () Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 1985. 744 p

biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, INGEOMINAS, Área metropolitana de Bucaramanga y artículos publicados por sociedad de ingeniería Colombiana; adicionalmente el director del proyecto otorgo bibliografía de apoyo para al estudio.

1.2.2 Fase II. Reconocimiento de la Zona de Estudio y recolección de datos.

Se llevó a cabo la visita a la zona de estudio, para la delimitación de los macizos rocosos a los cuales se les efectuaran los análisis geomecánico.

Posteriormente se efectuó la toma de datos, los cuales se dividen en tres etapas:

1. Toma de datos estructurales usando la brújula Brunton: rumbo y buzamiento de; estratos, dirección del talud, diaclasas, fallas y venas.
2. Medición de las estructura del Macizo rocoso: espaciado, continuidad, abertura, rugosidad, relleno, resistencia, grado de meteorización entre otras, de las familias de diaclasas presentes.
3. Medición de la resistencia del macizo rocoso por métodos de campo directos.

1.2.3 Fase III. Selección de Información Estructural y análisis de datos. Se procesaron los datos de campo tomados previamente en la fase 2, usando las mediciones sistemáticas de las estructuras presentes, su resistencia para caracterizar geotécnicamente los macizos rocosos. Posteriormente, se realizó un análisis de esfuerzos estructurales a nivel local usando diagramas estereográficos mediante los software programa Stereonet y Win Tensor para definir la dirección de los esfuerzos principales y patrones de fracturamiento que han influido en el cuerpo rocoso.

1.2.4 Fase IV. Análisis de resultados. En esta fase se calificó de manera cuantitativa el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos, basándose en

los estudio geológicos y geotécnicos previos, y en la clasificación geomecánica RMR (propuesta por Bieniawski³) y SMR (propuesta por Vallejo⁴).

1.2.5 Fase V. Edición del Informe Final. Edición y digitación del documento final del trabajo de investigación a partir de la interpretación; procesamiento y resultados obtenidos.

³ BIENIAWSKI, Z. T. Op. Cit.

⁴ GONZALEZ DE VALLEJO. Op. Cit.

2. GENERALIDAD DEL AREA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

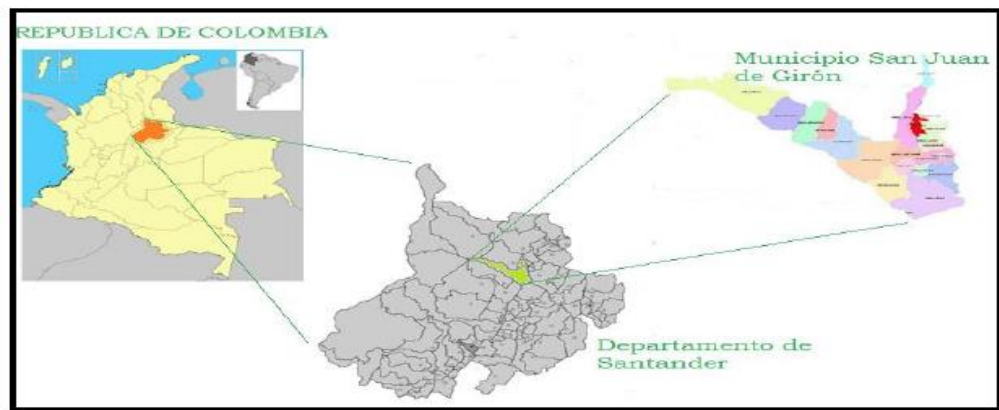
El área de estudio se localiza en el sector Alto de la vereda Carrizal, municipio de San Juan de Girón, Santander. La zona de influencias se encuentra limitada al oriente por el Río de Oro y la zona metropolitana de Bucaramanga, al occidente por el escarpe del municipio de Lebrija.

El área de estudio se encuentra localizado entre las coordenadas planas:

Xo: 1'098.656 - Yo: 1'277066 hasta X: 1'098.428 - Y: 1'275.012 (Km 64 64+350 hasta el Km 68+050).

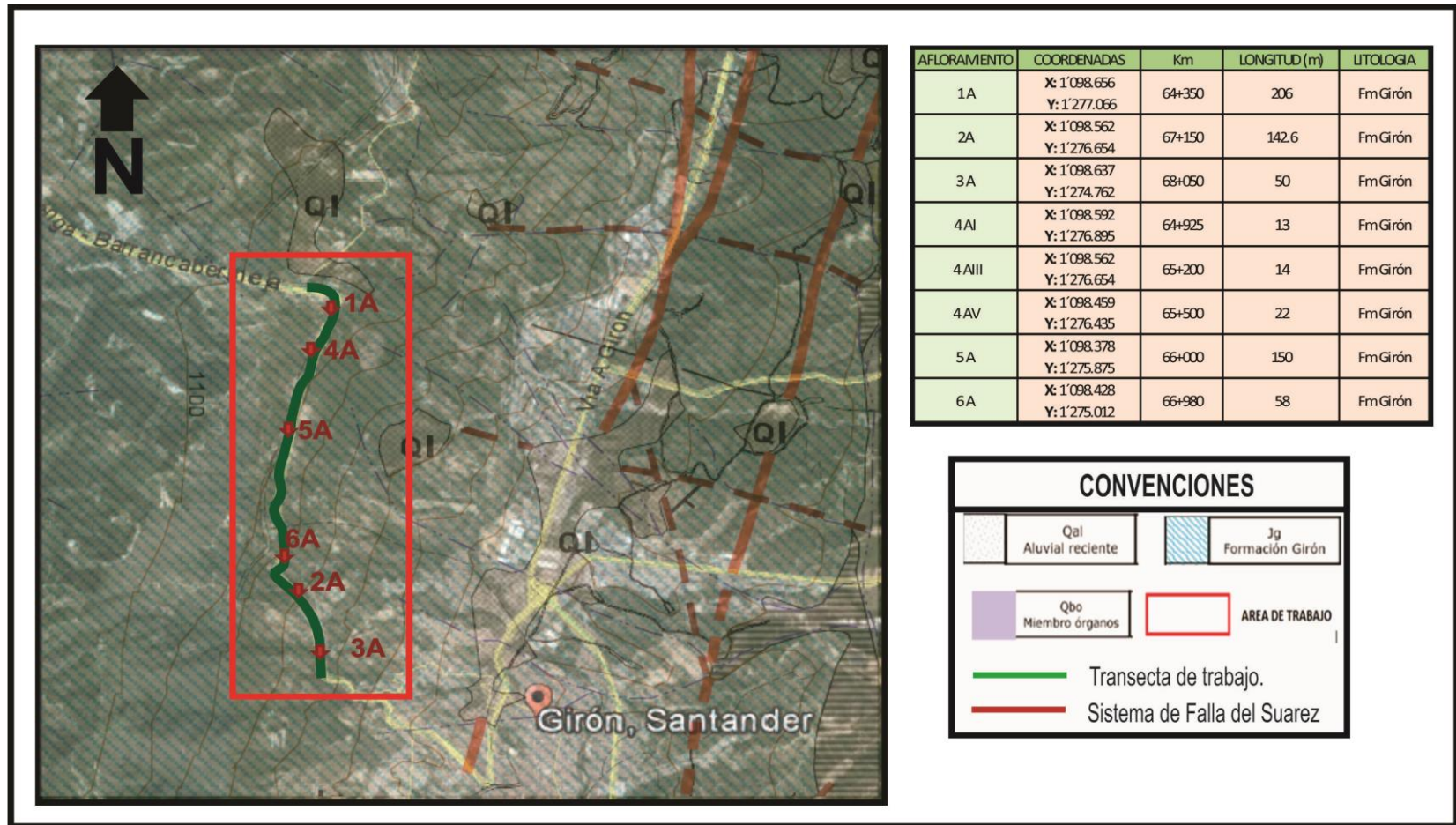
Geológicamente se encuentra localizado en una zona de influencia del sistema de Falla Bucaramanga-Santa Marta y la Falla del Suarez.

Figura 1. Localización del área del presente estudio, ubicado en el municipio de San Juan de Girón vía Barrancabermeja - peaje del aeropuerto Palonegro.



Fuente: del POT municipal de San Juan de Girón 2009.

Figura 2. Localización del área de estudio.



Fuente: Tomado y modificado de: Google Earth 2014 y Plancha 120-II-A escala 1:25.000 del IGAC (INGEOMINAS, 1973).

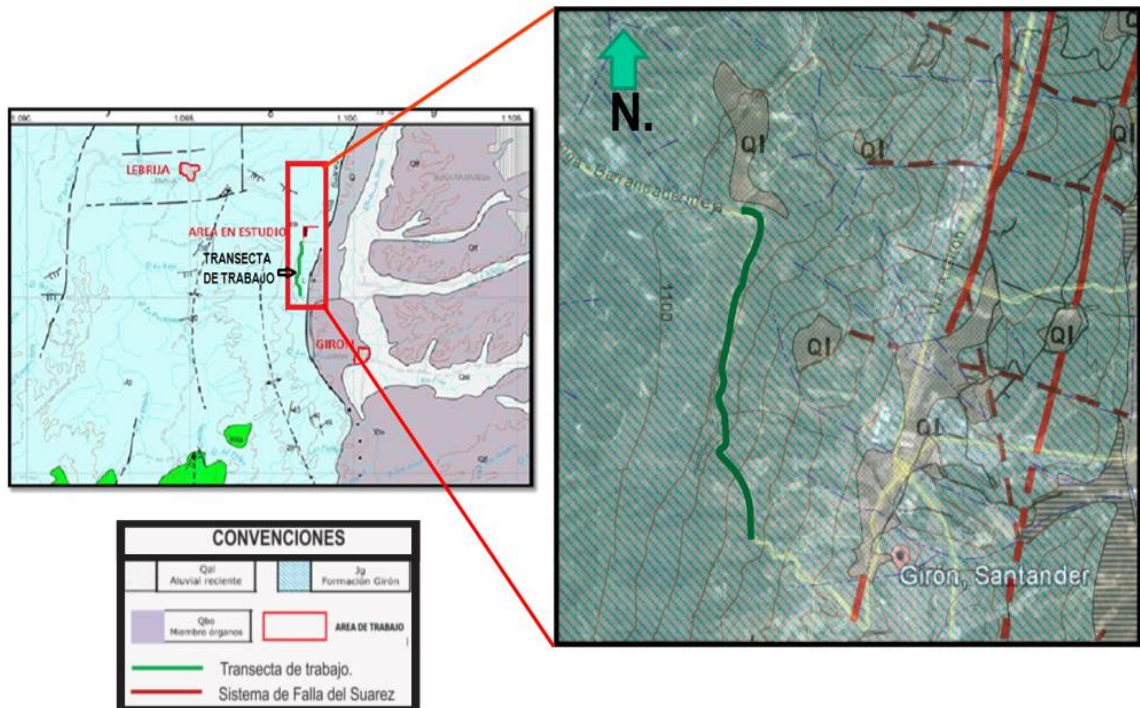
3. ESTADO DEL ARTE

3.1 GEOLOGIA DE LA ZONA

La zona de estudio está constituida por rocas sedimentarias con pendientes fuertes, haciéndola vulnerable a deslizamientos masivos de los coluviones a media ladera. Esta zona se caracteriza por el desprendimiento y caída de grandes bloques de roca, en eventos lluviosos o por acción de los movimientos sísmicos; lo que la convierte en peligrosa para la vía.

Presenta una fuerte erosión por profundización acelerada de las cañadas, en algunos sectores existen procesos activos de deslizamiento o erosión, los cuales están siendo acelerados por la intervención antrópica relacionada con el desarrollo urbano del área metropolitana de Bucaramanga. Los suelos en estas áreas son muy susceptibles a deslizamiento y erosión, además la intervención antrópica puede activar o acelerar procesos localizados o masivos de movimiento.

Figura 3. Mapa geológico regional entre Girón y Lebrija.



Fuente. Tomado y modificado de: Plancha 120-II-A escala 1:25.000 del IGAC (INGEOMINAS, 1973)⁵

3.1.1 Unidades Litológicas

3.1.1 Formación Girón. (Jg). Descrita inicialmente por Hettner (1892) como “Girón Series” en Ward et al., (1973). Similar a la formación Jordán, ésta unidad se presenta separada del Macizo de Santander por el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta; es decir que aflora al occidente de dicha estructura.

Estratigráficamente infrayace la formación Tambor y suprayace la formación Jordán. Las mayores exposiciones ocurren en la margen izquierda del río de Oro, en el cerro de Palonegro, sobre la vía que comunica con el aeropuerto, donde

⁵ INGEOMINAS, Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Subdirección de Amenazas Geoambientales. Bogotá. 2001

consta de conglomerados y areniscas, de color amarillo-naranja, alternando con capas de lodolitas rojas violáceas. Las rocas en dicho sector se presentan muy fracturadas y cizalladas debido a la acción del sistema de fallas del Suárez (INGEOMINAS, 2001).⁶

En la sección tipo, Cediél⁷ le midió un total de 4650 m.; la dividió en 7 facies litológicas que, en general, están constituidas de areniscas de grano grueso, con intercalaciones de areniscas conglomeráticas y capas rojas interestratificadas de limolita y arcillolita, en estratos hasta de 1 m de espesor, areniscas de grano grueso, conglomeráticas, gris claro, con estratificación cruzada y areniscas rojizas, de grano medio a grueso. Las capas conglomeráticas contienen guijos de cuarzo y de calizas hasta de 4 cm de diámetro.

Al occidente del río de Oro se encuentra cubierta, en su mayor parte, por depósitos sedimentarios de origen aluvial y coluvial, tales como la formación Bucaramanga y los flujos de escombros y detritos de Floridablanca y Piedecuesta, así como de otros provenientes del cerro de Palonegro.

3.1.2 Formación Jordán. (Jj). Cediél⁸, reconoció dos conjuntos litológicos divididos por una zona de transición de 10 metros de espesor, con base en una columna estratigráfica levantada al sur-oeste del pueblo de Los Santos en el camino El roto. El conjunto superior es de 200 metros de espesor y está formado por limolitas de color marrón rojizo y areniscas de grano muy fino y el conjunto inferior es de 100 metros y está compuesta por areniscas de grano grueso gris verdoso. Al Norte se encuentra un extenso afloramiento de esta formación, en la vereda la Purnia sobre la quebrada Seca.

⁶ INGEOMINAS, Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Subdirección de Amenazas Geoambientales. Bogotá2001

⁷ CEDIEL, F. «Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental.» Boletín Geológico Vol. 16 No 1-3: 5 – 96 1968

⁸ Ibid

La formación Jordán consta de limolitas de color marrón rojizo y arenisca de grano muy fino, bien estratificada y areniscas de grano grueso, gris verdoso en capas de hasta 1 metro de espesor, con ciertos niveles conglomeráticos hacia la base. El contacto inferior con la formación Silgará y el superior con la formación Girón son discordantes.

Se le asigna una edad Jurásica Inferior, basada en los conglomerados inferiores en el área de Piedecuesta, los cuales contienen guijos de la fase porfirítica del granito de Pescadero, del cual se obtuvo por datación radiométrica de 193 ± 6 millones de años.⁹

3.1.3 Depósitos Aluviales. Son los depósitos de material dejados por los ríos y quebradas mayores, los cuales se distribuyen de acuerdo a la altura y posición en los valles. Se dividen en Terrazas Medias (Qal2), Terrazas Bajas (Qal1) y Depósitos Aluviales de Cauce y Llanuras de Inundación (Qal).

3.1.3.1 Depósitos Aluviales de Terrazas Medias (Qal2): Como su nombre lo indica, son depósitos de origen aluvial, de superficie más o menos plana y horizontal, muy poco disectados, ubicados hacia las márgenes de las corrientes de agua principales. Su composición granulométrica es muy similar a la de los conos de deyección descritos en los flujos de escombros, incluso el tamaño máximo de los bloques es también superior a 1 m de diámetro y hay bloques esporádicos de 2 m.

3.1.3.2 Depósitos Aluviales de Terrazas Bajas (Qal1): Los mayores depósitos de este tipo conforman el área urbana de Girón, se observan en las márgenes de los ríos de Oro y Frío. Además corresponden estos depósitos a los niveles máximos de inundación alcanzados por las crecientes extraordinarias actuales.

⁹ WARD, Dwight; GOLDSMITH, Richard; CRUZ, Jaime; RESTREPO, Hernan «Geología de los cuadrangulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona Departamento de Santander». Boletín Geológico, Volumen XXI. No 1-3 1973

Los cortes de terraza, de profundidad inferior a 6 metros, muestran cantos subredondeados a redondeados de areniscas cuarzosas blancas, amarillentas y resistentes, guijos ígneo-metamórficos, algunas areniscas violáceas y fragmentos de cuarzo lechoso con una disposición no uniforme y algunos lentes arenosos.

3.1.3.3 Depósitos Coluviales o de Ladera (QI): Son depósitos acumulados, por lo general, en la base de escarpes, y provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes, por la acción de la fuerza de gravedad. La mayoría se originan por fenómenos de remoción en masa de tipo caída de rocas, deslizamientos y volcamiento. Son de común ocurrencia en escarpes de roca muy fracturada, saprolitos y depósitos de suelos finos.

Los coluviones están asociados con rocas meteorizadas y fracturadas de la formación Girón, localizadas sobre el sistema de la traza de la Falla de Suárez. Son depósitos de color amarillo claro y rojizo, en el que los cantos y bloques son principalmente de conglomerados y areniscas cuarzofeldespáticas rojizas, subangulares, de baja esfericidad.

3.1.3.4 Depósitos Aluviales de Cauce y Llanura de Inundación (Qal): Las principales acumulaciones están localizadas en los valles y llanuras de inundación de los ríos de Oro, Suratá, del Hato y Frío, además de sus quebradas tributarias como la Iglesia, Zapamanga, Suratoque, Aranzoque y en general toda la red hidrográfica que se desarrolla al occidente del Macizo de Santander, en especial las corrientes que entallan, de manera profunda, el abanico aluvial conformado por la formación Bucaramanga. Estos depósitos están compuestos por fragmentos de composición y granulometría muy variable.

3.1.4 Sistema de falla del Suarez. La falla del Suárez es un elemento regional, con una longitud cercana a los 100 Km, de rumbo promedio N30E y buzamiento aproximado de 69°W. Esta se extiende en el Cuadrángulo H-12 con un curso

sinuoso de Sur a Norte hasta su terminación en la Falla de Bucaramanga al norte de la ciudad.

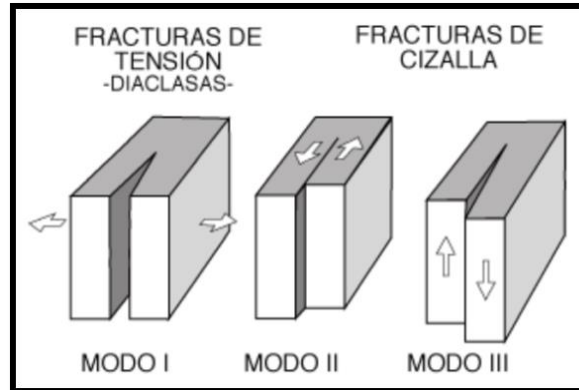
La falla está representada por una fractura que se orienta paralela al río Suárez a poca distancia de su cauce y por su margen izquierda. La falla del Suárez hunde su labio Este y tiene un juego muy reciente expresado en su marcada influencia en la morfología y en la red hidrográfica¹⁰. La falla presenta un desplazamiento sinistral, el cual es transmitido de manera regional a las fallas presentes en el municipio de los Santos. El sistema de fallas del Suárez choca contra la falla de Bucaramanga en los alrededores de las canteras de cementos Diamante al norte de la ciudad.

3.2 ASPECTOS INFLUYENTES

3.2.1 Estructuras discontinuas. Hay dos tipos básicos de estructuras discontinuas: Fallas – discontinuidades en las cuales un bloque ha deslizado y pasado a otro, y Diaclasas, donde el bloque se mueve, pero no se desliza sobre otro. Muchas de las vistas modernas de esas estructuras son basadas en la teoría de grieta:

¹⁰ JULIVERT, M., 1961 Geología de la vertiente W de la Cordillera Oriental en el sector de Bucaramanga: Univ. Indus. De Santander (Colombia) Bol. De Geología, no.8, p 39-42

Figura 4. Tipos de fracturas según Anderson. Modo I: Abertura, Modo II: Deslizamiento, Modo III: Desgarramiento. Las fallas son grietas del modo II o III, mientras que las diaclasas son grietas del modo I.



Fuente: CATALÁN J. Geología estructural y dinámica global. 2003

3.2.2 Diaclasas. “Las diaclasas son aspectos característicos de todas las rocas relativamente cerca de la superficie terrestre. Ellas son de gran importancia práctica debido a que ellas son superficies pre-fracturadas. Representan una ruptura en la roca a lo largo de la cual no ha habido cizallamiento, solo extensión. Básicamente, ellas son grietas de modo I (ver figura 4). Si estas no son rellenas con nada, son llamadas diaclasas; si hay material precipitado en la ruptura, entonces es llamada vena”.¹¹

“Las diaclasas sistemáticas comúnmente son significativamente suaves y planares con espaciamiento regular. Ellas casi siempre ocurren en grupos de diaclasas paralelas. Los grupos de diaclasas son sistemáticos sobre grandes regiones. Los sistemas de Diaclasas están compuestos de dos o más grupos de diaclasas. Las diaclasas que ocurren regularmente (no cruzan) entre dos miembros de un grupo de diaclasas son llamadas Diaclasas cruzadas”¹²

¹¹ CATALÁN J. Geología estructural y dinámica global. Departamento de Geología, España, Universidad de Salamanca, Caps. 2 y 3. 2003

¹² Ibíd.

Los sistemas de diaclasas son consistentes sobre largas regiones indicando que la escala de los procesos que controlan el diaclasamiento es también de naturaleza regional.¹³

“Se presentan algunos tipos especiales de diaclasas, tales como Diaclasas de enfriamiento en rocas volcánicas: El proceso involucrado es contracción termal, una vez la roca se enfría esta se contrae, estriándose aparte. Este es la fuente de la bien conocidas diaclasas columnares en las rocas basálticas, etc.”¹⁴

3.2.3 Fallas. “Las fallas son fracturas de cizalla con un movimiento relativo apreciable (ver figura 6). En rocas que no están fracturadas previamente, las fallas, como cualquier otro tipo de fracturas, se crean cuando el estado de esfuerzo es tal que en planos determinados de la roca se cumple la condición de fracturación, que viene dada por la envolvente de Mohr de esa roca. Como la superficie terrestre es siempre un plano principal del elipsoide de esfuerzo y como aproximadamente es horizontal a gran escala, dos de los esfuerzos principales cerca de la superficie deben ser horizontales y uno vertical”.¹⁵

3.2.4 Meteorización. La meteorización es la alteración de una roca por la acción de la atmósfera, la hidrósfera o los seres vivos. Esta alteración se produce en el mismo lugar donde ha aflorado a la superficie, sin que se produzca transporte de material. Se suele clasificar a la meteorización en tres tipos: físico-mecánico, químico y biológico.

“El grado de meteorización de la roca es una condición importante para las propiedades mecánicas de la roca. Según avanza el proceso de meteorización aumentan la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al

¹³ Ibid

¹⁴ Ibid

¹⁵ Ibid

tiempo que disminuye su resistencia.”¹⁶ La identificación del estado de meteorización de la matriz rocosa se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción del grado de meteorización para los macizos rocosos.

Término	Descripción
Fresca	No se observa signos de meteorización en la matriz rocosa.
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales se deben mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos.

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p

3.3 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS GEOMECÁNICO

Se denomina macizo rocoso al conjunto conformado por la matriz rocosa y las discontinuidades que afectan al material de roca en conjunto. En cuanto a propiedades geomecánicas, un macizo rocoso se considera como un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo, gobernado mecánicamente por los planos de fracturamiento, los cuales generan discontinuidades o superficies de debilidad, separando bloques de matriz rocosa y generando inestabilidad en el macizo.

Las propiedades físicas que controlan las características resistentes y deformacionales de la matriz rocosa (composición mineralógica, densidad, estructura y fábrica, porosidad, permeabilidad, alterabilidad, dureza, densidad,

¹⁶ GONZALEZ DE VALLEJO Op. Cit.

etc.), las cuales son resultados de la génesis, condiciones y procesos geológicos y tectónicos sufridos por las rocas.¹⁷ Además el comportamiento mecánico de los macizos rocosos está influenciado por las características geológicas y discontinuidades del terreno puesto que los planos de debilidad preexistentes son los que controlan los procesos de deformación y rotura en los macizos.

También hay que tener en cuenta las diferencias entre el tiempo geológico y el tiempo a escala humana siendo un aspecto fundamental respecto a las consecuencias que las obras de ingeniería pueden generar sobre el terreno. Las obras “aceleran” determinados procesos que tardarían cientos o miles de años en producirse: la meteorización, la liberación de tensiones naturales, aperturas de discontinuidades, modificación de flujos de agua, etc. Todos ellos producen una disminución en la resistencia de los macizos rocosos en periodos de tiempo muy corto.¹⁸

Para el análisis de la resistencia de roca, existen diferentes métodos los cuales se pueden clasificar como:

1. **Métodos de Laboratorio** en los cuales se requiere la toma de núcleos de rocas y posteriormente análisis en laboratorio como contenido de humedad, gravedad específica y absorción, porosidad y densidad, resistencia a la compresión uniaxial y triaxial, resistencia en carga puntual, entre otras variedad de análisis que ayudan a entender el comportamiento de la roca.
2. **Métodos de Campo** en los cuales se determina la resistencia en el mismo sitio de estudio (estudio *in situ*), para ello se implementa el uso del martillo Schmidt o Esclerómetro.

¹⁷ Ibid

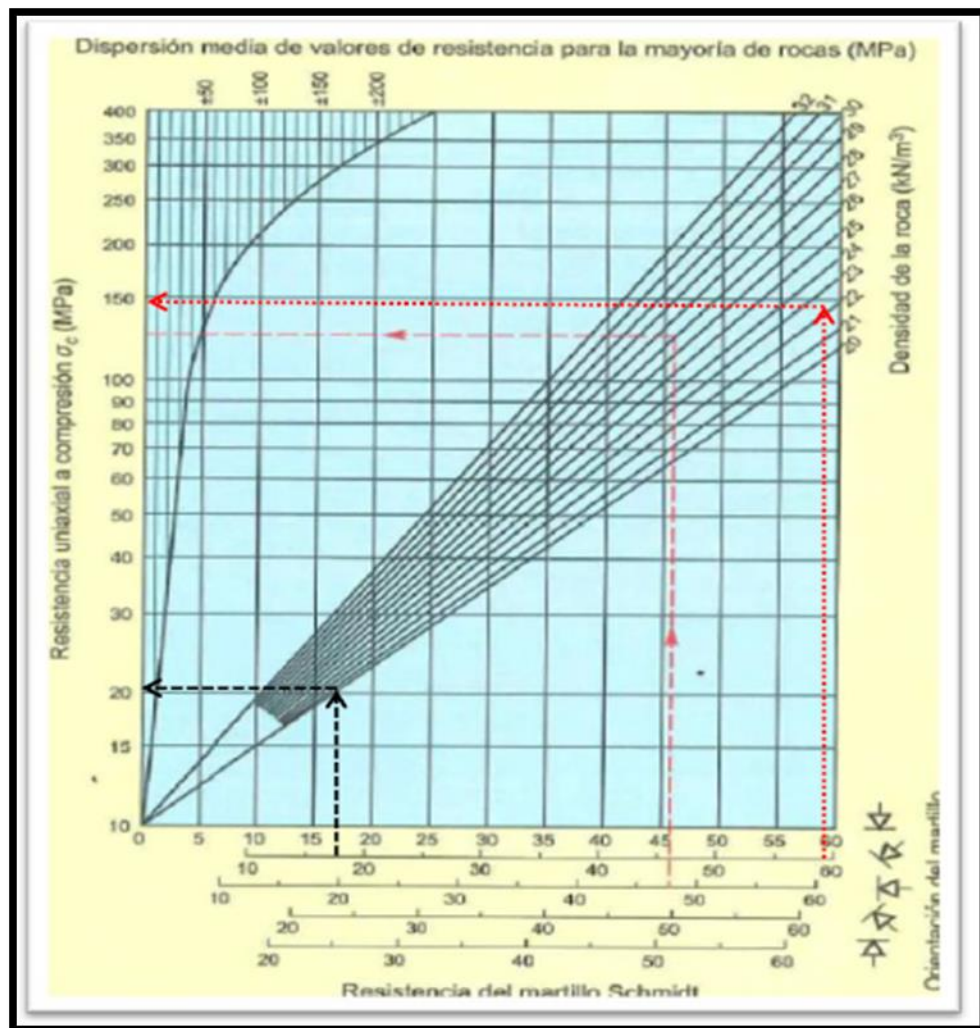
¹⁸ Ibid

El martillo Schmidt o Esclerómetro es un aparato que dispone de un muelle en su interior, y de una punta retráctil, la cual al ser presionada contra la roca, hace que el muelle se dispare. Para tomar la medida, se debe limpiar el área sobre la cual se va a colocar el martillo, luego, se presiona el martillo hasta que salta el muelle. Hay que tener en cuenta que el aparato se debe colocar perpendicularmente a la superficie. Para calcular la resistencia a partir del martillo Schmidt se debe tener en cuenta la tabla presente en la Figura 4.

Con los datos de laboratorio y de campo se prosigue a realizar el análisis de los macizos por medio de una clasificación en base a aspectos geotécnicos. Diversos autores han establecido métodos para la clasificación de los mismos los cuales han sido mejorado subsecuentemente; sin embargo la mayoría de estos se han basado en observaciones cualitativas por consiguiente se hace de gran importancia una interpretación lo más precisa y correcta.

Cálculo de la Resistencia a partir del Martillo Schmidt y la densidad de la muestra:

Figura 5. Ábaco utilizado para realizar la resistencia uniaxial a compresión, determinada tomando como punto de partida los rebotes registrados en el martillo con su respectiva inclinación. Se determina la densidad de la muestra en el laboratorio para luego realizar la intersección con los datos del martillo obteniendo así la resistencia uniaxial a compresión.



Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p

Los métodos más importantes para la caracterización de macizos rocoso en geotecnia son: **RMR, RQD, SMR, GSI y MRMR**.

Uno de los modelos de clasificación más utilizados es el propuesto por Bieniawski en 1973, que se conoce como RMR (Siglas de Rock Mass Rating).

En esta clasificación se tienen en cuenta aspectos como:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Para utilizar la clasificación RMR, se recomienda dividir el macizo rocoso en zonas más o menos homogéneas, es decir, que tengan propiedades geológicas similares. Para cada tramo definido, se toman datos referentes a las propiedades de la matriz rocosa y a las discontinuidades que estén presentes. Para la clasificación RMR necesitamos conocer previamente el índice RQD de Deere (1967).

El índice RQD (Rock Quality Designation) lo define Deere en 1967 como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud en su eje, sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo: también se utiliza cuando el macizo está expuesto y puede hacer una observación representativa de las características, miden sobre el macizo directamente y haciendo una correlación comparable a la prospección del sondeo.

Para realizar este proyecto los índices de RQD se llevaran a cabo de forma teórica, ya que no se contara con núcleos para su eventual análisis, solo se realizara de forma teórica.

Se calcula el RQD teórico debido a que no se cuenta con testigos de sondeo para realizar la relación entre la longitud del núcleo y los fragmentos no fracturados mayores a 10 cm, por tanto de los datos tomados en campo se registró que el espaciado de las juntas se encuentran en el intervalo de 0,2 – 0,6 metros, permitiendo así aplicar la relación teórica para el cálculo del RQD.

Figura 6. Ecuación para calcular el valor teórico de RQD.

$$RQD = 100 \cdot e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

Donde λ es la frecuencia media de discontinuidades por metro

Fuente: (Vallejo, 2002)

Para trabajar en la clasificación RMR de Bieniawski de 1989 se usa los parámetros presentes en la Tabla 2

Figura 7. Ecuación para encontrar el valor del R.M.R.

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Tabla 2. Clasificación RMR para macizo Rocoso (Bieniawski, 1989).

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)										
Parámetros de clasificación										
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)			
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1	
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50 %	< 25 %			
	Puntuación		20	17	13	6	3			
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m			
	Puntuación		20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación		6	4	2	1	0		
		Abertura		Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Relleno		Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación		6	4	2	2	0		
		Alteración		Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación		6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel		Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor		0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general		Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Gotearo	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0		
Corrección por la orientación de las discontinuidades										
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables				
Puntuación	Túneles		0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones		0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60			
Clasificación										
Clase	I	II	III	IV	V					
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala					
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20					

Fuente: Ingeniería Geológica (Vallejo. 1985).

Otra de las clasificaciones es el índice SMR de Romano (1997) el cual se obtiene a partir del RMR, y sirve para evaluar la estabilidad de una excavación en el talud. El índice SMR se halla para cada familia de diaclasas identificada en el afloramiento, y se toma el menor valor de los obtenidos.

Figura 8. Ecuación para calcular el índice SMR.

$$SMR = RMR + (F1 * F2 * F3) + F4$$

- **F1:** depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y de la cara del talud. Varía entre 1,00 (cuando ambos rumbos son paralelos) y 0,15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es mayor de 30° y la probabilidad de rotura es muy baja). Estos valores, establecidos empíricamente, se ajustan aproximadamente a la expresión:

Figura 9. Formula de F1: αd y αs son los valores del rumbo de la discontinuidad y del talud respectivamente.

$$F1 = [1 - \text{sen}(\alpha d) - \alpha s]^2$$

- **F2** depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia al esfuerzo de corte. Varía entre 1,00 (para discontinuidades con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para discontinuidades con buzamiento inferior a 20°).

Figura 10. Formula de F2: bd es el buzamiento de la discontinuidad. F2 vale 1,00 para las roturas por vuelco.

$$F2 = [\tan^2(bd)]^2$$

- **F3** refleja la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y el talud. Se han mantenido los valores propuestos por Bieniawski en 1976 que son siempre negativos.
- **F4** se determina dependiendo el método de excavación.

Tabla 3. Clasificación SMR de macizos rocosos (Romano, 1988).

Clasificación geomecánica de taludes SMR						
Factores de ajuste por la orientación de las juntas (F_1, F_2 y F_3)						
Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
P/T	F_1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	F_2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F_2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0 - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	—	—
P/T	F_3	0	-6	-25	-50	-60
Factor de ajuste por el método de excavación (F_4)						
Método	Talud natural	Precorte	Voladura suave	Voladura o excavación mecánica	Voladura deficiente	
F_4	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8	
Clases de estabilidad						
Clase	V	IV	III	II	I	
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 40	61 - 80	81 - 100	
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena	
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable	
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna	
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno	
P: rotura plana		α_j : dirección del talud	β_j : buzamiento del talud			
T: rotura por vuelco		α_j : dirección de las juntas	β_j : buzamiento de las juntas			

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis et al. Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p

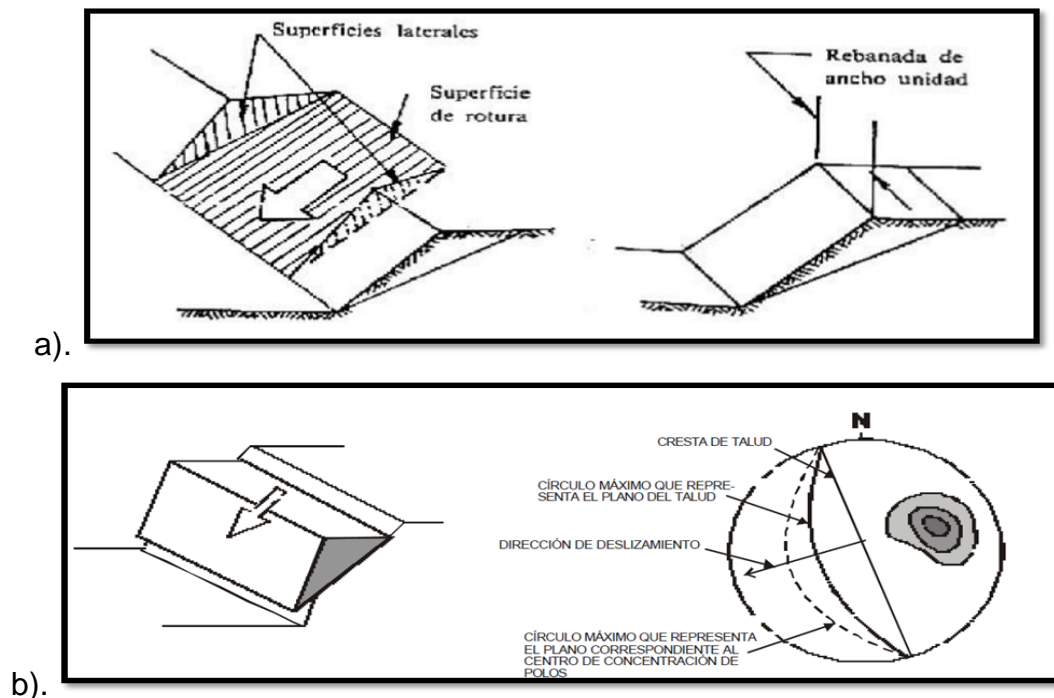
3.4 TIPO DE FALLAS EN TALUDES ROCOSOS².

3.4.1 Falla por rotura planar. Se llama rotura planar a aquella en la que el desplazamiento se produce a través de una única superficie plana. Es la más sencilla de las formas de rotura posibles y se produce cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud.

Frecuentemente se trata de fallas que interceptan al talud; También se producen entre dos terrenos que presentan buenas características resistentes, se encuentra intercalado un estrato o terreno de poco espesor de material mal consolidado o resistente. Este tipo de rotura no es muy frecuente, debido a que debe darse dos condiciones para su desarrollo:

- Los rumbos del plano del talud y del plano de deslizamiento deben ser paralelos o casi paralelos, formando entre si un ángulo máximo de 20° .
- Los límites laterales de la masa deslizante han de producir una resistencia al deslizamiento despreciable.

Figura 11. Esquemas de métodos de estabilidad en Taludes por rotura planar.
a). Representación bidimensional de falla por rotura planar. b). Proyección semiesférica equiareal de Schmidt de falla por rotura planar.



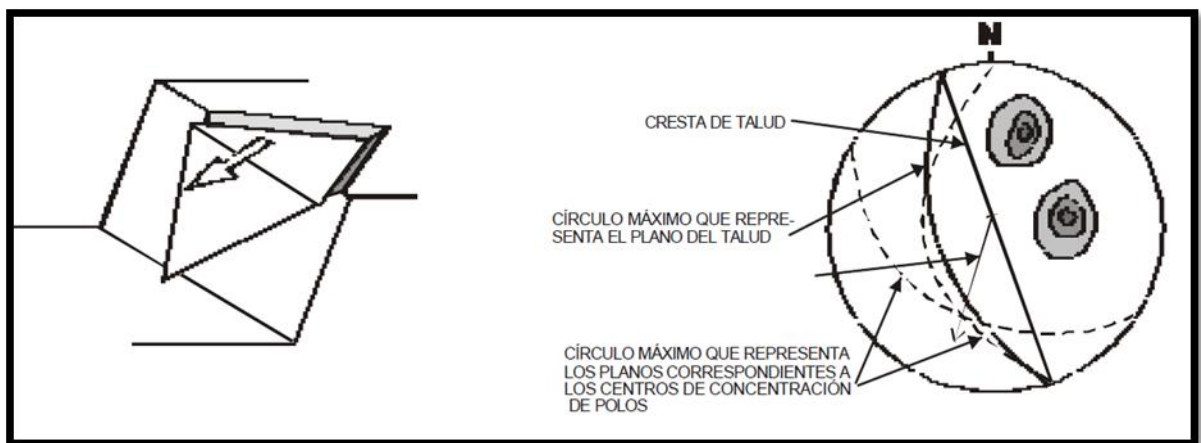
Fuente: Esquemas de HOEK E, BRAY J.W., (1999) sacado de HERRERA R., Fernando (2002); Guía de Cálculo de Estabilidad de Talud. Madrid. Capítulo 1; Página 6.

Estas condiciones permiten el estudio de la estabilidad de talud como un problema bidimensional considerando una zona como rebanada de ancho unidad, limitada por dos planos verticales las cuales se encuentran perpendiculares al plano del talud.

3.4.2 Falla por rotura en cuña. Se denomina rotura en cuña aquella que se produce a través de dos discontinuidades oblicuas a la superficie del talud, con la línea de intersección de ambas aflorando en la superficie del mismo y buzando en sentido contrario o desfavorable. Este tipo de rotura se origina preferentemente en macizos rocosos en los que se da una disposición adecuada, en orientación y buzamiento de las diaclasas.

Si proyectamos el plano del talud y las discontinuidades en una proyección semiesférica equiareal de Schmidt, la disposición típica de los casos en que es posible este tipo de rotura, es como en el que aparece en la Figura 12.

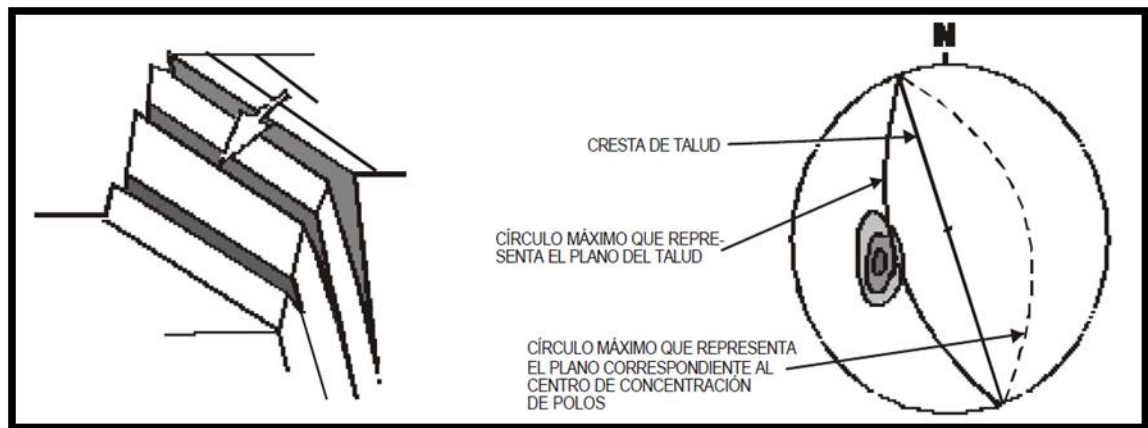
Figura 12. Esquemas de métodos de estabilidad en Taludes. Proyección semiesférica equiareal de Schmidt de falla por rotura en cuña.



Fuente: Esquemas de HOEK E, BRAY J.W., (1999) sacado de HERRERA R., Fernando (2002); Guía de Cálculo de Estabilidad de Talud. Madrid. Capítulo 1; Página 6.

3.4.3 Falla por rotura con vuelco o volcamiento. Se denomina rotura en vuelco o volcamiento cuando en las discontinuidades observamos la existencia de dos familias de discontinuidades con direcciones subparalelas a las de talud, una de ellas con un buzamiento muy suave y en el mismo sentido que el talud y una segunda familia con un gran buzamiento opuesto al del talud y ligeramente perpendicular al juego anterior, la primera familia delimitará los bloques rocosos y proporcionará la superficie sobre la que deslizarán o girarán los bloques en función del buzamiento que posean.

Figura 13. Esquemas de métodos de estabilidad en Taludes. Proyección semiesférica equiareal de Schmidt de falla por rotura con vuelco.



Fuente: Esquemas de HOEK E, BRAY J.W., (1999) sacado de HERRERA R., Fernando (2002); Guía de Cálculo de Estabilidad de Talud. Madrid. Capítulo 1; Página 6.

4. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS TALUDES ROCOSOS¹⁹

La clasificación de los macizos rocosos para fines de la geotecnia tiene como finalidad la obtención de parámetros geomecánicos para su empleo en el diseño y proyectos de obras de ingeniería.

Los macizos rocosos, como medios discontinuos, presentan un comportamiento geomecánico complejo que, de una forma simplificada, puede ser estudiado y categorizado en función de su aptitud para distintas aplicaciones. Por este objetivo surgieron las clasificaciones del comportamiento mecánico par los macizos rocosos.

4.1 METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS

El procedimiento a seguir para la descripción general de los aspectos y características observables a simple vista, en base a los cuales se establecen distintas zonas diferenciándolas de acuerdo a la litología, estructura tectónicas, estado de meteorización, etc.; posteriormente, se describe a detalle las diferentes zonas del macizo rocoso y sus propiedades; finalmente, a partir de todos los datos obtenidos, se clasifica geomecánicamente los macizos rocosos.

Con el fin de caracterizar sistemática de los macizos rocosos se puede resumir en las siguientes etapas:

- Descripción de las características generales del afloramiento.

¹⁹ GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002

- División en zonas y descripción de cada zona.
- Descripción de los parámetros del macizo.
- Caracterización global y clasificación geomecánica del macizo rocoso.

4.2 DESCRIPCION GENERAL DEL AFLORAMIENTO

El primer paso consiste en la identificación del macizo rocoso y su descripción general. Posteriormente se divide en zona y se describe cada una de ellas. Es útil la toma de fotografías y dibujos esquemáticos del afloramiento, donde se observen las características importantes de cada zona.

Figura 14. Foto del Afloramiento No. 3 donde se observa la división en las zonas.



La división en zonas al afloramiento se basa en criterios litológicos y estructurales considerando los sectores lo más homogéneo posible, donde el número y extensión de cada zona dependerá del grado de heterogeneidad de los materiales

y estructuras que formen el macizo, la extensión del afloramiento y el grado de detalle del estudio.

4.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL TALUD

Para la toma de datos estructurales del macizo rocoso se mide su rumbo y buzamiento en Azimut del rumbo usando la brújula. El primer dato estructural a tomar es el del talud, el cual para el Afloramiento No. 1 se obtuvo 0/63, medido en Azimut de rumbo, seguidamente se divide el afloramiento en zonas (Figura 15) las cuales se toma el dato correspondiente.

Figura 15. Toma de datos estructurales de rumbo y buzamiento.



4.4 DESCRIPCIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

Las discontinuidades condicionan de una forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulica de los macizos rocosos. Para la descripción y definición de los parámetros físicos y geométricos que

condicionan sus propiedades y su comportamiento mecánico se tienen establecidos ciertos parámetros que se tienen que medir en campo: Orientación, Espaciamiento, Continuidad o persistencia, Rugosidad, Resistencia, Abertura, Relleno y Filtración.

4.4.1 Orientación de las discontinuidades. La orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de continuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea). Su medición se realiza mediante una brújula con clinómetro o con el diaclasímetro. (Tabla 4).

Tabla 4. Datos estructurales del afloramiento No. 3.

Familia Diaclasas	Zona	BUZAMIENTO	RUMBO
Bedding	I	63	73
Join 1		50	103
Join 2		76	130
Bedding	II	65	60
Join 1		68	285
Join 2		65	66
Join 3		83	73
Bedding	III	65	65
Join 1		80	300
Join 2		48	210
Afloramiento		60	0

4.4.2 Espaciado en las discontinuidades. El espaciado entre los planos de discontinuidad condiciona el tamaño de los bloques de matriz rocosa y, por lo tanto, define un papel que está tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso.

El espaciado se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. La

medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de la discontinuidad.

Tabla 5. Descripción del espaciado de las discontinuidades

DESCRIPCIÓN DEL ESPACIADO	
Descripción	Espaciado
Extremadamente junto	<20
Muy junto	20-60 mm
Junto	60-200 mm
Moderadamente junto	200-600 mm
Separado	600-2.000 mm
Muy separado	2.000-6.000mm
Extremadamente separado	>6.000 mm

Fuente: Ingeniería Geológica (Vallejo. 1985).

Figura 16. Ejemplo del espaciado de las discontinuidades en el afloramiento No.3.



Tabla 6. Datos del espaciado del afloramiento No.3.

Familia Diaclasas	Zona	ESPACIAMIENTO (mm)
Join 1	I	300
Join 2		450
Join 1	II	500
Join 2		410
Join 3		350
Join 1	III	220
Join 2		380

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

Tabla 7. Descripción de la continuidad de las discontinuidades.

DESCRIPCIÓN DE LA CONTINUIDAD	
Continuidad	Longitud
Muy baja continuidad	<1m
Baja continuidad	1-3 m
Continuidad media	3-10 m
Alta continuidad	10-20 m
Muy alta continuidad	>20 m

Fuente: Ingeniería Geológica (Vallejo. 1985).

Figura 17. Ejemplo de la continuidad de las discontinuidades.



Tabla 8. Datos de la continuidad en las discontinuidades del afloramiento No.3.

Familia Diaclasas	Zona	CONTINUIDAD (m)
Join 1	I	3 - 10
Join 2		3 - 10
Join 1	II	3 - 10
Join 2		3 - 10
Join 3		3 - 10
Join 1	III	3 - 10
Join 2		3 - 10

4.4.4 Abertura de las discontinuidades. La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede ser muy variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso. La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante, ya que modifica las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes.

Tabla 9. Descripción de la abertura de las discontinuidades.

DESCRIPCIÓN DE LA ABERTURA	
Abertura	Descripcion
<0.1 mm	Muy cerrada
0.1-0.25 mm	Cerrada
0.25-0.5 mm	Parcialmente abierta
0.5-205 mm	Abierta
2.5-10 mm	Moderadamente ancha
>10 mm	Ancha
1-10 cm	Muy ancha
10-100 cm	Extremadamente ancha
>1m	Cavernosa

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

Figura 18. Ejemplo de medición de las aberturas de las discontinuidades por medio de un calibrador.



Tabla 10. Datos de la abertura en las discontinuidades del afloramiento No.3.

Familia Diaclasas	Zona	AERTURA (mm)
Join 1	I	<0,1
Join 2		<0,1
Join 1	II	<0,1
Join 2		<0,1
Join 3		<0,1
Join 1	III	<0,1
Join 2		<0,1

4.4.5 Rugosidad en las discontinuidades. La rugosidad y ondulación inherente en las discontinuidades se refiere al plano principal de una discontinuidad. Ambas características contribuyen a la resistencia del macizo rocoso. La rugosidad está influenciada por la textura, tamaño de los granos o minerales y el grado de alteración de los minerales; por lo cual esta puede aumentar a resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor de relleno.

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 mediciones cuantitativas.

Tabla 11. Descripción de la abertura de las discontinuidades.

RUGOSIDAD (mm)		
ESCALONADA	ONDULOSA	PLANA
I Rugosa	IV Rugosa	VII Rugosa
II Lisa	V Lisa	VIII Lisa
III Pulida	VI Pulida	IX Pulida

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

Figura 19. Ejemplo de la rugosidad – ondulación de las discontinuidades mediante la comparación visual con los perfiles estándar de rugosidad sacados .



Tabla 12. Datos de rugosidad en las discontinuidades del afloramiento No.3.

Familia Diaclasas	Zona	RUGOSIDAD (mm)		
		ESCALONADA	ONDULOSA	PLANA
Join 1	I	RUGOSA		
Join 2		RUGOSA		
Join 1	II		LISA	
Join 2			LISA	
Join 3			LISA	
Join 1	III		LISA	
Join 2			LISA	

4.4.6 Relleno en las discontinuidades. Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe gran variedad de material de relleno con propiedades físicas y mecánicas.

Debe tenerse en cuenta que si se trata de un material blando o alterado, este puede sufrir variación importante en sus propiedades resistentes a corto plazo si cambia su contenido de humedad o si tiene lugar algún movimiento a lo largo de las juntas.

Tabla 13. Descripción de la abertura de las discontinuidades.

RELLENO		
METEORIZACIÓN	FILTRACIÓN	RESISTENCIA
Sana	Seco	Muy Blanda
Algo meteorizada	Húmedo	Blanda
Media meteorizada	goteos	consistente
Muy meteorizada	Flujo	Muy consistente
complet. Meteorizada		Dura
suelo residual		Muy dura

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

Figura 20. Ejemplo de la rugosidad de las discontinuidades.



Tabla 14. Datos de rugosidad en las discontinuidades del afloramiento No.3.

Familia Diaclasas	Zona	RELLENO		
		METEORIZACIÓN	FILTRACIÓN	RESISTENCIA
Join 1	I	Algo Meteorizada	seco	blanda
Join 2		Algo Meteorizada	seco	blanda
Join 1	II	Algo Meteorizada	seco	blanda
Join 2		Algo Meteorizada	seco	blanda
Join 3		Algo Meteorizada	seco	consistente
Join 1	III	Algo Meteorizada	seco	consistente
Join 2		Algo Meteorizada	seco	consistente

4.4.7 Resistencia de las paredes de la discontinuidad. La resistencia de las paredes de la 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. La resistencia puede estimarse en campo con el martillo Schmitd, el cual se le aplica directamente sobre las discontinuidades.

Figura 21. Medición de la resistencia de las paredes de la discontinuidad en el afloramiento No 3 usando el martillo Schmidt.



Tabla 15. Datos de resistencia de las discontinuidades del afloramiento No. 3.

ZONA I	ZONA II	ZONA III
Rebotes (R)	Rebotes (R)	Rebotes (R)
20	22	63
17	18	61
20	20	60
10	10	59
15	15	58
14	18	61
17	19	56
22	22	58
18	18	61
15	16	59
Rebote promedio	Rebote promedio	Rebote promedio
16.8	17.8	59.6

4.5 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL TALUD ROCOSO

La clasificación de los macizos rocosos con base en los aspectos geotécnicos se emplea para el cálculo de parámetros geomecánicos que son necesarios para el desarrollo de proyectos de ingeniería.

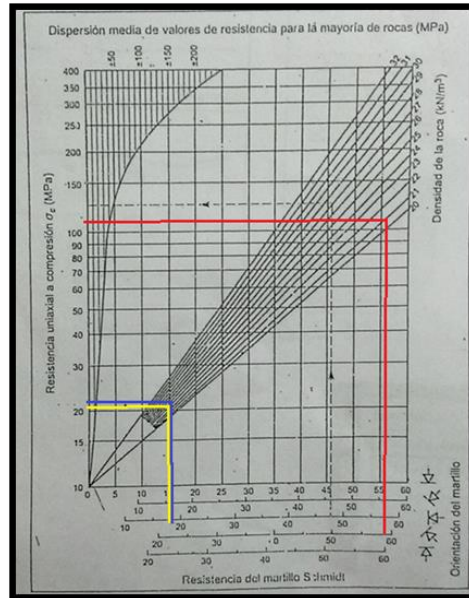
Para trabajar en la clasificación RMR de Bieniawski de 1989 se usan los parámetros de la **Tabla 2** los cuales valora los siguientes parámetros:

- a. Resistencia del material intacto (ensayo carga puntual o compresión simple).
- b. R.Q.D.
- c. Distancia entre las discontinuidades.
- d. Estado de las discontinuidades.
- e. Agua subterránea.

4.5.1 Resistencia del material intacto (Ensayo de carga puntual o compresión simple). Para la realización de este proyecto se realizó ensayos de carga puntual como se observa en el apartado 5.4.7 el cual muestra la resistencia de las paredes de discontinuidad.

Usando los resultados de rebotes de la **Tabla 16** y la densidad de las muestras referentes en cada uno de las zonas del macizo calculamos la Resistencia de cada una de ellas mediante el uso del ábaco de la **Figura 5**.

Figura 22. Ábaco usado para determinar la resistencia uniaxial a compresión dependiendo de la resistencia del martillo Schmidt, la densidad de la muestra y la posición del martillo a la hora de la medida.



Convenciones	
	Zona I
	Zona II
	Zona III

Tabla 16. Calculo de Resistencia por zonas y puntuación para el afloramiento No. 3.

DIA 3					
ZONA I		ZONA II		ZONA III	
Rebotes (R)	Densidad (KN/m3)	Rebotes (R)	Densidad (KN/m3)	Rebotes (R)	Densidad (KN/m3)
20	22,1	22	22,1	63	21,4
17		18		61	
20		20		60	
10		10		59	
15		15		58	
14		18		61	
17		19		56	
22		22		58	
18		18		61	
15		16		59	
Rebote	16.8	Rebote	17.8	Rebote	59.6

DIA 3					
ZONA I		ZONA II		ZONA III	
Rebotes (R)	Densidad (KN/m3)	Rebotes (R)	Densidad (KN/m3)	Rebotes (R)	Densidad (KN/m3)
promedio		promedio		promedio	
Resistencia (MPa)		Resistencia (MPa)		Resistencia (MPa)	
23		25		112	
Puntuación		Puntuación		Puntuación	
2		4		12	

La zona I obtuvimos una densidad (ρ) de 22.1 (KN/m3) con una Resistencia (σ_c) de 23 (MPa); en la zona II obtuvimos una densidad (ρ) de 22.1 (KN/m3) con una Resistencia (σ_c) de 25 (MPa); en la zona III obtuvimos una densidad (ρ) 21.4 (KN/m3) con una resistencia (σ_c) de 112 (MPa). En este caso la zona III presenta un mejor comportamiento en comparación con las zonas II y I.

Una vez conocido el resultado de σ_c en las diferentes zonas, se remite a la Tabla 2 y se le asigna un puntaje según el rango en el que se encuentre situado.

4.5.2 Medición del RQD (Rock Quality Designation). Para definir los índices de RQD se llevó a cabo mediante su forma teórica, debido a la falta de recuperación de testigos o núcleos en campo.

Para el cálculo del RQD teórico se usa la fórmula indicada en la **figura 6**. Se usa los datos de espaciamiento de la **Tabla 7**.

Tabla 17. Promedio de espaciamiento y resultado de λ .

XZonas	Promedio espaciamiento (mm)	λ
Zona I	375	2.666666667
Zona II	420	2.380952381
Zona II	300	3.333333333

Ejemplo de cálculo de RQD para la zona I del afloramiento No. 3.

$$(1) \text{ RQD zona I} = 100 * (0,1 \lambda + 1) * 1 \times 10^{(-0,1 \lambda)}$$

En donde:

$\lambda = 1/S$ ∴ S= espaciamiento en metros.

$$(2) \text{ RQD zona I} = \{100 * [0.1(2.666666667) + 1] * 1 \times 10^{[-0.1(2.666666667)]}\}$$

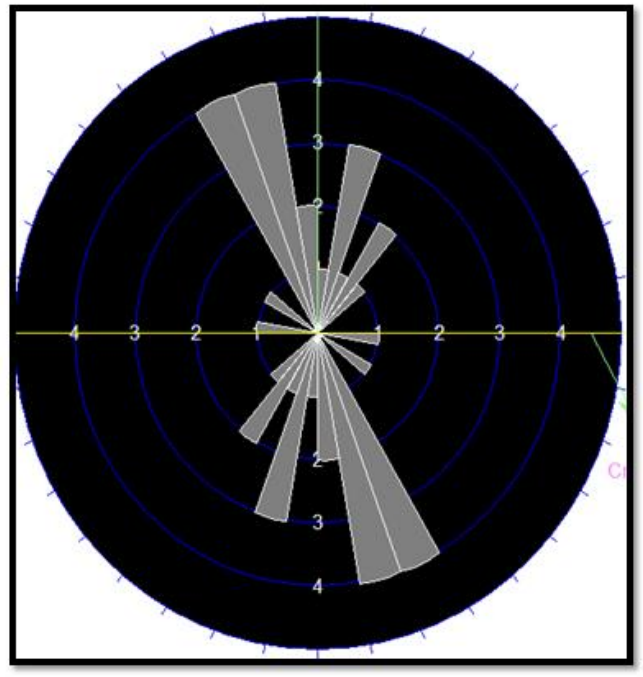
$$(3) \text{ RQD zona I} = 68.54814003\%$$

Tabla 18. Resultados del RQD teórico y puntuación para el afloramiento No.3.

ZZonas	RQD (%)	Puntuación
Zona I	68.54814003	13
Zona II	71.55810238	13
Zona II	61.88785111	13

4.5.3 Estado de las discontinuidades Con los datos estructurales del talud y las familias de diaclasas, se realiza un diagrama de rosetas mediante el uso del programa **DIPS**. Se observa que ninguna de las discontinuidades presentes en el macizo tiene o se acerca a la dirección y buzamiento del talud, lo cual hace que sea **muy favorable** a la estabilidad.

Figura 23. Diagrama de rosetas mostrando las direcciones de las familias de diaclasas y la dirección del talud.



Convención	
-----	Dic. Talud

Tabla 19. Corrección por orientación de las discontinuidades de acuerdo al diagrama de rosetas.

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medias	Desfavorable	Muy desfavorable
Puntuación	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

4.5.4 Condición de las discontinuidades. Para esta medición tendremos en cuenta los parámetros descritos en los apartados 5.4.2 – 5.4.6 (Longitud de la

discontinuidad, abertura, rugosidad, relleno y alteración) y la puntuación descrita en la Tabla 2.

Tabla 20. Sumatoria de las condiciones de las discontinuidades.

Parámetros de clasificación RMR	Puntaje		
	Zona I	Zona II	Zona II
Separación entre diaclasas	4	4	4
Abertura	5	5	5
Rugosidad	5	1	1
Relleno	2	2	2
Alteración	5	5	5
Puntuación general	21	17	17

4.5.5 Agua freática. Durante el estudio de campo la zona de estudio presento precipitaciones mínimas, pero es importancia anotar, ya que el estado de agua en superficie puede variar de acuerdo al estado del clima en el cual uno desarrolle la fase de campo.

Tabla 21. Clasificación según la presencia de aguas freáticas.

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Agua freática	Estado general	seco	ligeramente	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
Puntuación		15	10	7	4	0

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

4.5.6 Clasificación RMR de Bieniawski de 1989. Para calcular el RMR definitivo nos basamos en los parámetros obtenidos con la puntuación de la tabla 2 y la formula de RMR de la figura 24.

Figura 24. Ecuación para encontrar RMR con las áreas de cada zona.

$$RMR = (A1*P1+A2*P2+A3*P3+An*Pn)/(A1+A2+A3+An)$$

Para la aplicación de la formula RMR definitiva (**Fig. 24**) se necesita hallar las áreas de cada una de la zonas del afloramiento trabajado.

Tabla 22. Áreas de cada una de las zonas del afloramiento No. 3.

AREA= B*H [m^2]					
Zona I					
BASE	19.5	ALTURA	20	Área	390
Zona II					
BASE	45	ALTURA	20.3	Área	913.5
Zona III					
BASE	34	ALTURA	15	Área	510

Tabla 23. Puntuación total para el cálculo de RMR.

Parámetros de clasificación RMR	Puntaje		
	Zona I	Zona II	Zona II
Separación entre diaclasas	4	4	4
Abertura	5	5	5
Rugosidad	5	1	1
Relleno	2	2	2
Alteración	5	5	5
Agua freática	15	15	15
Corrección por orientación	-5	-5	-5
Resistencia de la matriz	2	4	12
RQD	13	13	13
Puntuación general	46	44	52
Área	390	913.5	510
Puntuación	17940	40194	26520

Parámetros de clasificación RMR	Puntaje		
	Zona I	Zona II	Zona II
Σ Puntuación Área	84654		
Puntuación Total	46.67990074		

La puntuación del RMR final nos dio **46.67**, el cual queda calificado como un Macizo **Clase III de calidad media**.

Tabla 24. Clasificación de acuerdo a la calidad del talud.

Clasificación					
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Fuente: GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

*Las tablas y resultados de los demás afloramientos se pueden observar en los anexos A y C.

4.6 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS TALUDES SMR (ROMANO, 1997)

El Índice SMR se obtiene mediante el RMR definiendo unos factores de ajuste por orientación de las discontinuidades y por el método de excavación²⁰; el método a usar en el proyecto es el de orientación de las discontinuidades el cual es productos de los sub factores F1, F2, F3 y F4 (**Fig 9-10**) y la **Tabla 3** (apartado 3.3)

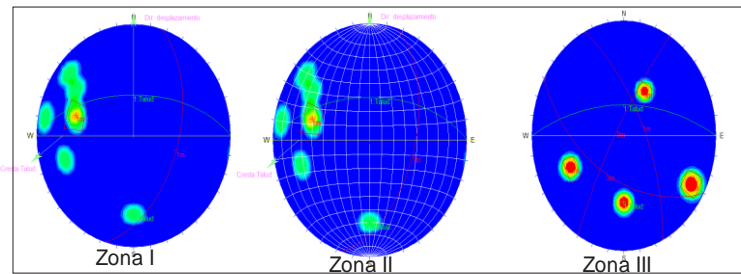
²⁰ GONZALEZ DE VALLEJO (1985) Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

Para el cálculo del SMR necesitamos conocer previamente el RMR del talud y definir el tipo de rotura del talud; para el tipo de rotura nos guiamos del apartado 3.4 y de datos obtenidos mediante el programa DIPS Rocscience el cual está diseñado para el análisis de las características relacionadas con el análisis de ingeniería de estructuras y mecánica de rocas, sin embargo, el formato libre del archivo de datos de *Dips* permite el análisis de datos que se basen en la orientación.

Las variables a tener en cuentas para definir el tipo de rotura son:

- Dirección del talud
- Buzamiento del talud
- Dirección de las diaclasas
- Buzamiento de las diaclasas
- Determinación de las familias de diaclasas

Figura 25. Tipo de rotura por zona del afloramiento No.3 trabajad mediante el programa Dips.



De acuerdo a los resultado que se observan en la Fig. 25, la zona I y II son propensas a falla de rotura planar, mientras en la zona III es propensa a una falla de rotura en cuña (apartado. 3.4).

Tabla 25. Cálculo del SMR en el afloramiento No.3

Familia de	Zona I		Zona II			Zona II	
	1	2	1	2	3	1	2
α_j	103	130	285	66	73	300	210
α_s	0						
P	103	130	285	66	73		
F1	0.15		0.15			0.15	
β_j	50	76	68	65	63	80	48
β_s	63						
F2	1		1			1	
T						120	30
F3	-6		-6			-6	
F4	0		0			0	
RMR	46.67990074						
SMR	45.77990075						

Convenciones	
α_j	Dirección diaclasas
α_s	Dirección talud
β_j	Buzamiento diaclasas
β_s	Buzamiento Talud
P	rotura planar
T	rotura por vuelco

Para definir el SRM se usa la ecuación dada en la figura 8 referida en el apartado 3.3; como resultado nos da que el SRM final de nuestro Talud es de 45.77990075, según este resultado clasificamos al talud como un normal Clase III parcialmente estable (ver tabla 3).

Los resultados para los demás afloramientos se pueden observar en la tabla 26; Se observó que los afloramientos 2A, 4A y 5A presentan una mala clasificación,

mientras que los afloramientos 1 A, 3A y 6A presentan una clasificación media. (Ver anexo C).

Tabla 26. Resultado de clasificación RQD, RMR y SMR para cada uno de los afloramientos trabajados.

Talud	RQD (%)		RMR		SMR	
Afloramiento No.1	63	Media	46	Regular	48	Normal
Afloramiento No.2	29	Mala	30	Mala	30	Mala
Afloramiento No.3	64	Media	47	Regular	46	Normal
Afloramiento No.4A1I	51	Media	31	Mala		
Afloramiento No. 4A3I	55	Media	35	Mala		
Afloramiento No.4A5I	58	Media	37	Mala		
Afloramiento No.5	58	Media	33	Mala		
Afloramiento No.6	63	Media	52	Regular		

CONVENCIONES	
	SIN DATOS

5. ANALISIS DE LOS ESFUERZOS EN EL MACIZO ROCOSO POR MEDIO DEL SOFTWARE LIBRE WIN-TENSOR.

Win tensor se utiliza para el manejo de datos estructurales frágiles, consignando en una base de datos estructurada los datos obtenidos en campo con el fin de realizar la reconstrucción de los paleoesfuerzos. Este programa, se ha desarrollado con el fin de satisfacer las necesidades de los geólogos que trabajan en el análisis de fallas frágiles y reconstrucción paleoesfuerzos.

Este software nos permite por medio de los datos obtenidos en campo, determinar los esfuerzos que actúan sobre una zona en específico, determinando la dirección principal de los esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . También permite realizar diagramas de polos, diagramas de rosetas y analizar los esfuerzos por medio del círculo de mor, con el fin de determinar la cinemática del área de estudio y como esta afecta el área estudiada.

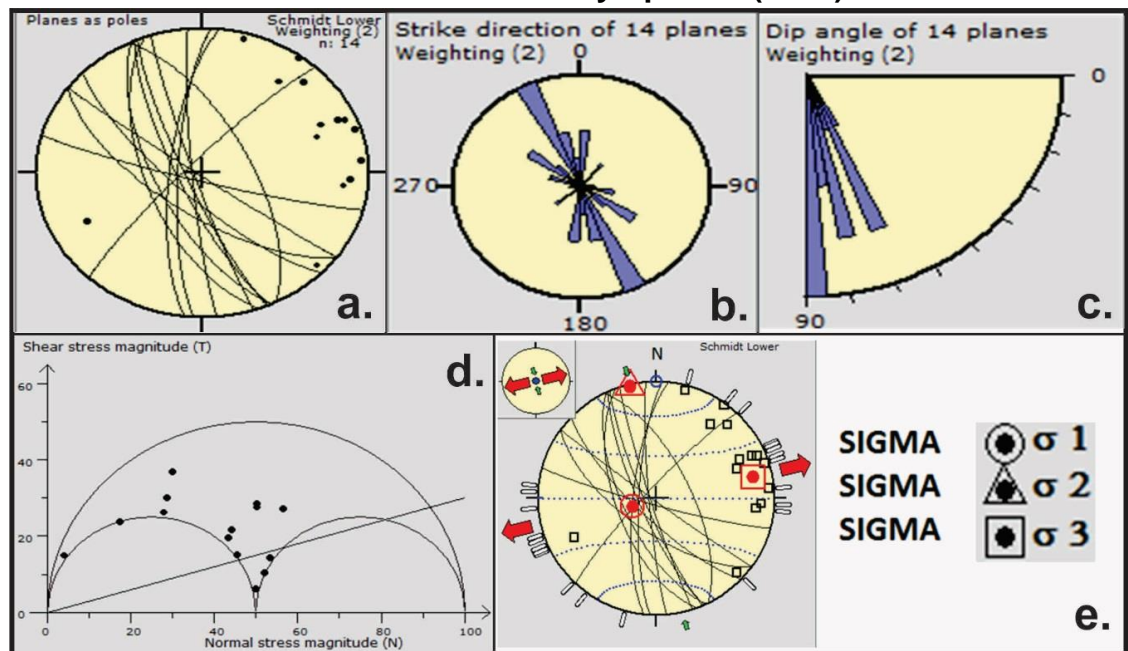
5.1. RESULTADOS DEL SOFTWARE LIBRE WIN-TENSOR.

La clasificación de los macizos se realizó por trayectos, en los cuales se tomaron datos estructurales medidos en azimut de rumbo, los cuales sirvieron para analizarlos en el software de uso libre Win-Tensor. Estos trayectos son 6 en total y cada uno de ellos se divide a su vez en zonas; las cuales me agrupan las diferentes litologías existentes en el área.

A continuación se presentaran los resultados obtenidos por el software libre Win-Tensor, para cada trayecto analizado.

AFLORAMIENTO 1.

Figura 26. Afloramiento 1. a. Datos estructurales en Stereonet. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). b. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, en los que se evidencian los 14 rumbos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). c. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, donde se evidencian los 14 buzamientos de las 3 familias de Diaclasas. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). d. Circulo de MOHR, en Win-Tensor. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). e. Conclusión de Resultados, en Win-Tensor. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).

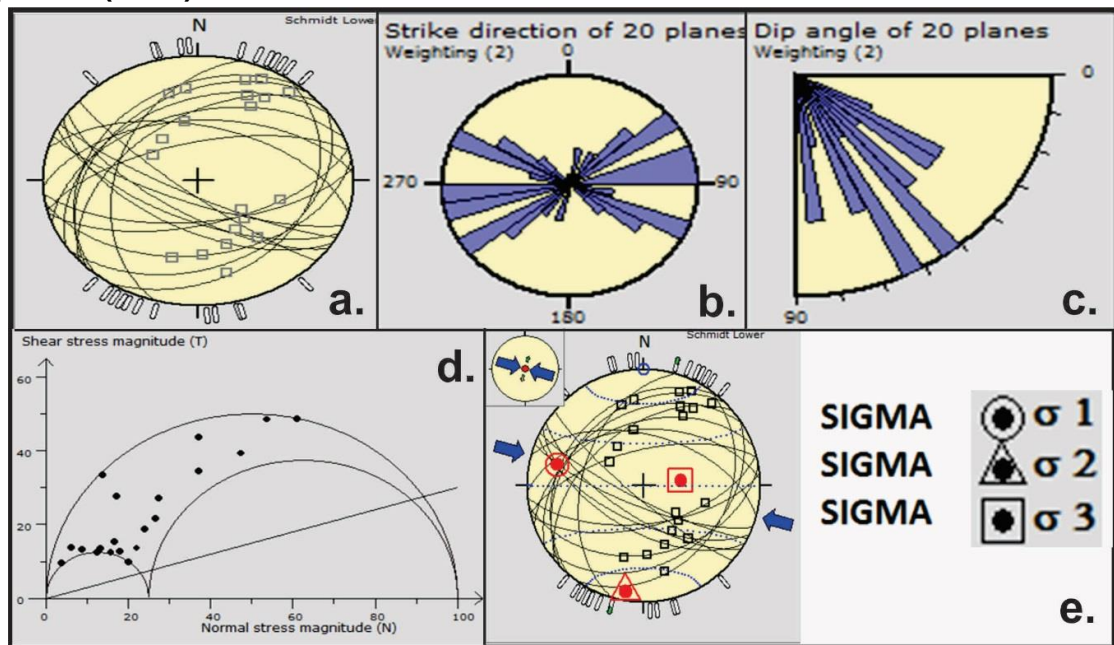


En esta grafica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 14 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. Cada uno de los puntos plasmados en el círculo de MOHR, representan datos estructurales de las diaclasas mediante él, se puede apreciar que la mayoría de los datos están por encima del límite de deformación frágil dúctil tomando un rol de fractura reactivada en su mayoría con comportamiento frágil que caracteriza a esta familia en general. Solamente los datos estructurales de las diaclasas # 8, 14,10,

muestran un rol de fractura no activa. Las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3 nos indican que este macizo presenta esfuerzos de tipo extensional. El resultado obtenido del software libre Win-Tensor se comparó con los datos obtenidos en campo para verificar que en el Afloramiento 1 están actuando esfuerzos extensionales.

AFLORAMIENTO 2.

Figura 27. Afloramiento 2. a. Datos estructurales en Stereonet, en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas en los que se evidencian los 20 rumbos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas donde se evidencian los 20 buzamientos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y Modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).

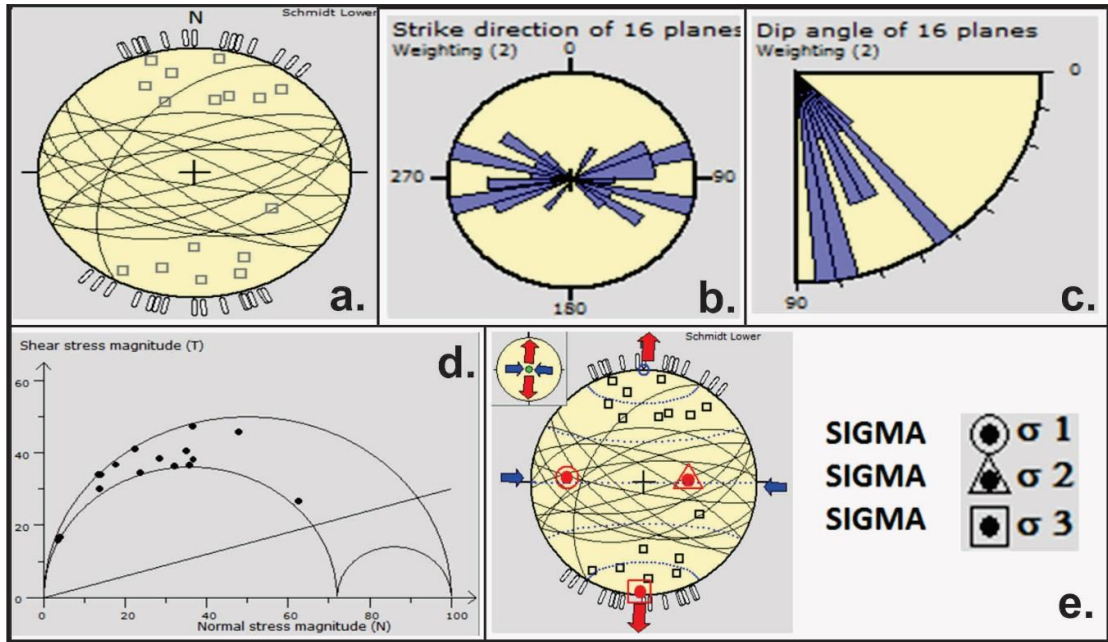


Se realizó el análisis de los esfuerzos, mediante el análisis de 20 datos estructurales de Rumbo y Buzamiento de las principales familias de diaclasas. En la gráfica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 20 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de

diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. Cada uno de los puntos plasmados en el círculo de MOHR, representan datos estructurales de las diaclasas, se puede apreciar que la mayoría de los datos están por encima del límite de deformación frágil dúctil, tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, mostrando un comportamiento frágil que caracteriza a este macizo en general. Los resultados obtenidos por el software libre de Win-Tensor para el Afloramiento 2, muestran las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3; y nos indican que este macizo presenta esfuerzos compresivos. El resultado obtenido del software libre Win-Tensor se comparó con los datos obtenidos en campo para verificar que en el Afloramiento 2 están actuando esfuerzos compresivos.

AFLORAMIENTO 3.

Figura 28. Afloramiento 3. a. Datos estructurales en Stereonet, en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, en el que se evidencian los 16 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas donde se evidencian los 16 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).

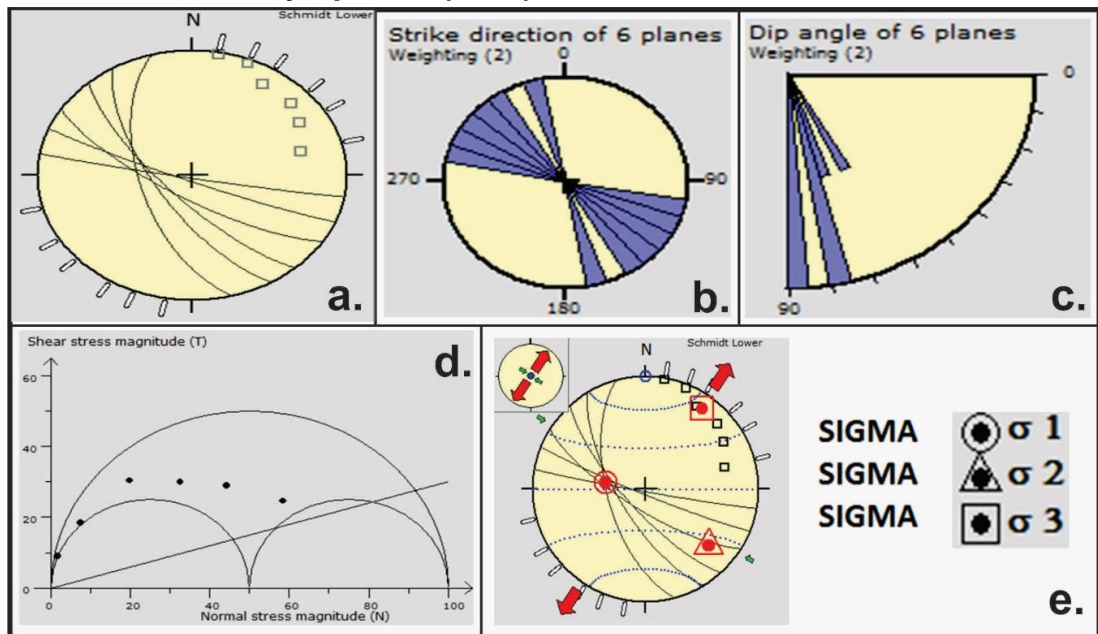


Se realizó el análisis de los esfuerzos, mediante el análisis de 16 datos estructurales de Rumbo y Buzamiento de las principales familias de diaclasas. En la gráfica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 16 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. Cada uno de los puntos plasmados en el círculo de MOHR, representan datos estructurales de las diaclasas, se puede apreciar que la mayoría de los datos están por encima del límite de deformación frágil dúctil, tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, mostrando un comportamiento frágil que caracteriza a este macizo en general. Los resultados obtenidos por el software libre de Win-Tensor para el

Afloramiento 3, muestran las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3; y nos indican que este macizo presenta tanto esfuerzos compresivos, como esfuerzos extensivos. El resultado nos muestra que el sigma 1 está generando esfuerzos compresivos y el sigma 3 está generando esfuerzos extensivos, El resultado obtenido del software libre Win-Tensor se comparó con los datos obtenidos en campo para verificar que en el Afloramiento 3 están actuando esfuerzos compresivos y extensivos, siendo el esfuerzo compresivo la principal fuerza que actúa sobre el Afloramiento 3.

AFLORAMIENTO 4 A1I.

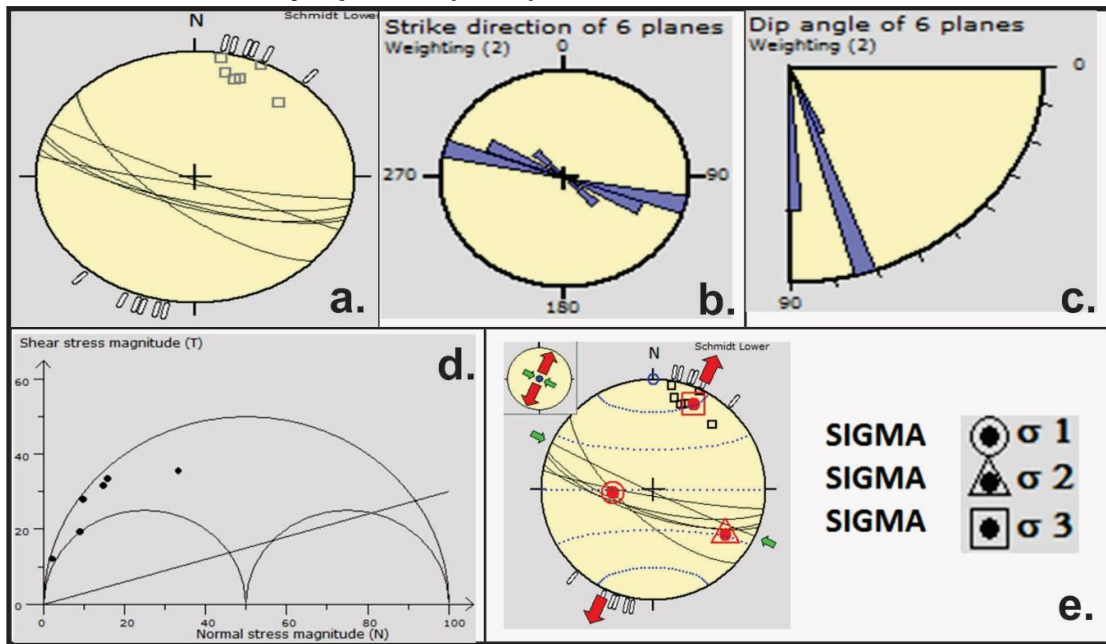
Figura 29. Afloramiento 4A1I. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 6 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, se evidencian los 6 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).



Se realizó el análisis de los esfuerzos, mediante el análisis de 6 datos estructurales de Rumbo y Buzamiento de las principales familias de diaclasas. En la gráfica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 6 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. Cada uno de los puntos plasmados en el círculo de MOHR, representan datos estructurales de las diaclasas, se puede apreciar que la mayoría de los datos están por encima del límite de deformación frágil dúctil, tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, mostrando un comportamiento frágil que caracteriza a este macizo en general. Los resultados obtenidos por el software libre de Win-Tensor para el Afloramiento 4A11, muestran las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3; y nos indican que este macizo presenta tanto esfuerzos compresivos, que son los que predominan en el macizo, como también presenta esfuerzos extensivos. El resultado nos muestra que el sigma 1 y el sigma 2 están generando esfuerzos compresivos y el sigma 3 está generando esfuerzos extensivos, El resultado obtenido del software libre Win-Tensor, se comparó con los datos obtenidos en campo para verificar que en el afloramiento 4 A11 están actuando esfuerzos compresivos y extensivos, siendo el esfuerzo compresivo la principal fuerza que actúa sobre este macizo.

AFLORAMIENTO 4A3I.

Figura 30. Afloramiento 4A3I. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 6 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, donde se evidencian los 6 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).

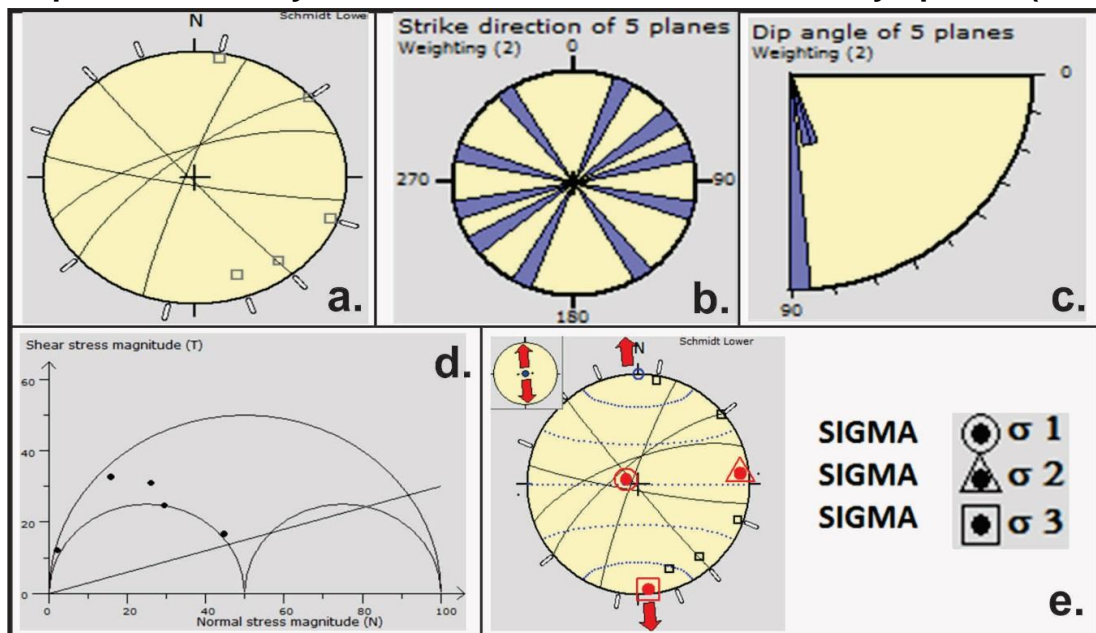


Se realizó el análisis de los esfuerzos, mediante el análisis de 6 datos estructurales de Rumbo y Buzamiento de las principales familias de diaclasas. En la gráfica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 6 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. Cada uno de los puntos plasmados en el círculo de MOHR, representan datos estructurales de las diaclasas, se puede apreciar que la mayoría de los datos están por encima del límite de deformación frágil dúctil, tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, mostrando un comportamiento frágil que caracteriza a este macizo en general. Los resultados obtenidos por el software libre de Win-Tensor para el

Afloramiento 4A3I, muestran las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3; y nos indican que este macizo presenta tanto esfuerzos compresivos, que son los que predominan en el macizo, como también presenta esfuerzos extensivos. El resultado nos muestra que el sigma 1 y el sigma 2 están generando esfuerzos compresivos y el sigma 3 está generando esfuerzos extensivos, El resultado obtenido del software libre Win-Tensor, se comparó con los datos obtenidos en campo para verificar que en el afloramiento 4 A3I están actuando esfuerzos compresivos y extensivos, siendo el esfuerzo compresivo la principal fuerza que actúa sobre este macizo.

AFLORAMIENTO 4A5I.

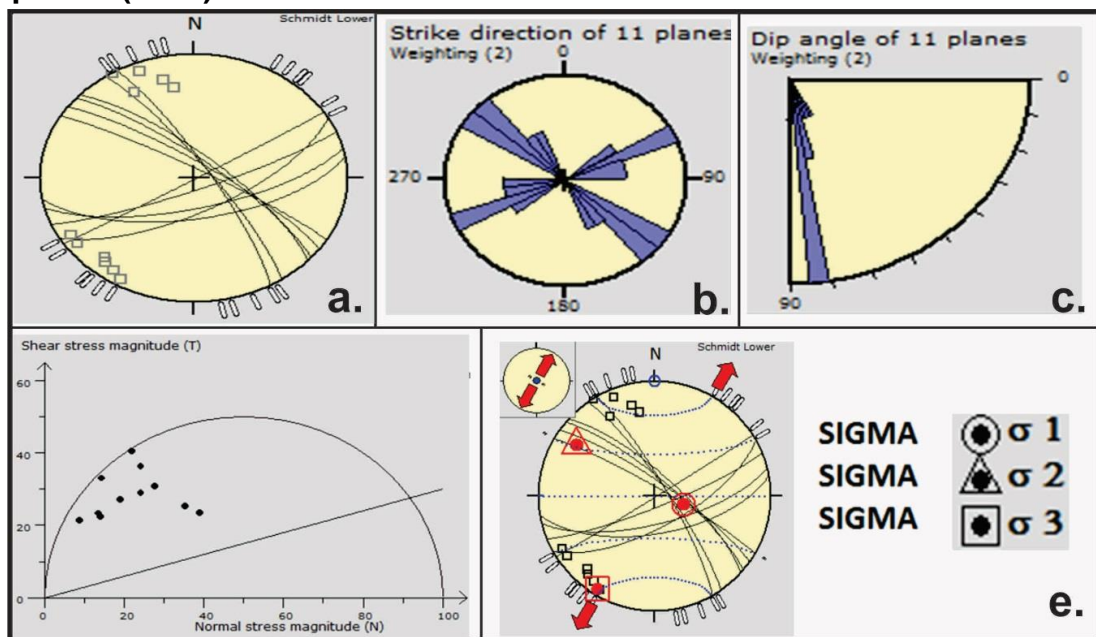
Figura 31. Afloramiento 4A5I. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Datos del afloramiento 4 A3. Diagrama de Rosetas en Win-Tensor, en los que se evidencian los 5 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas se evidencian los 5 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).



Se dividió en 3 zonas, se obtuvieron 3 familias de Diaclasas que a su vez brindaron 5 datos estructurales de rumbo y buzamiento de las principales familias de diaclasas. En esta grafica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 5 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. En el círculo de MOHR se puede apreciar que todos los datos están por encima del límite de deformación frágil dúctil tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, mostrando un comportamiento frágil que caracteriza a este macizo en general. Las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3; indican que en este macizo predomina los esfuerzos extensivos. El resultado obtenido del software libre Win-Tensor se comparó con los datos obtenidos en campo para verificar que en este afloramiento actúan esfuerzos extensivos.

AFLORAMIENTO 5.

Figura 32. Afloramiento 5. a. Datos estructurales en Stereonet del afloramiento 5. En él se muestran los planos y sus respectivos polos. Tomada de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003). b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 11 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 11 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).

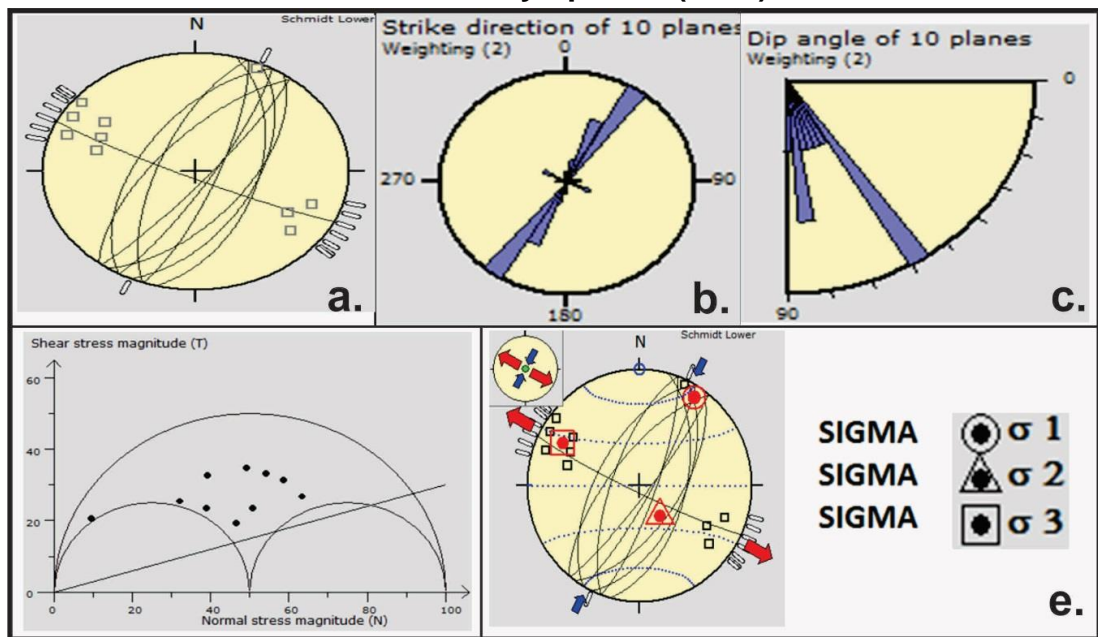


Se dividió en 5 zonas, se obtuvieron 3 familias de diaclasas con 11 datos estructurales de rumbo y buzamiento. En esta grafica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 11 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. Cada uno de los puntos fueron plasmados en el círculo de MOHR en donde se puede apreciar que todos se encuentran por encima del límite de deformación frágil dúctil tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, mostrando un comportamiento frágil lo que caracteriza a este macizo. Las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3

nos indican que predominan los esfuerzos extensivos. El resultado obtenido del software libre Win-Tensor se comparó con los datos obtenidos en campo para verificar que en este afloramiento están actuando esfuerzos extensionales.

AFLORAMIENTO 6.

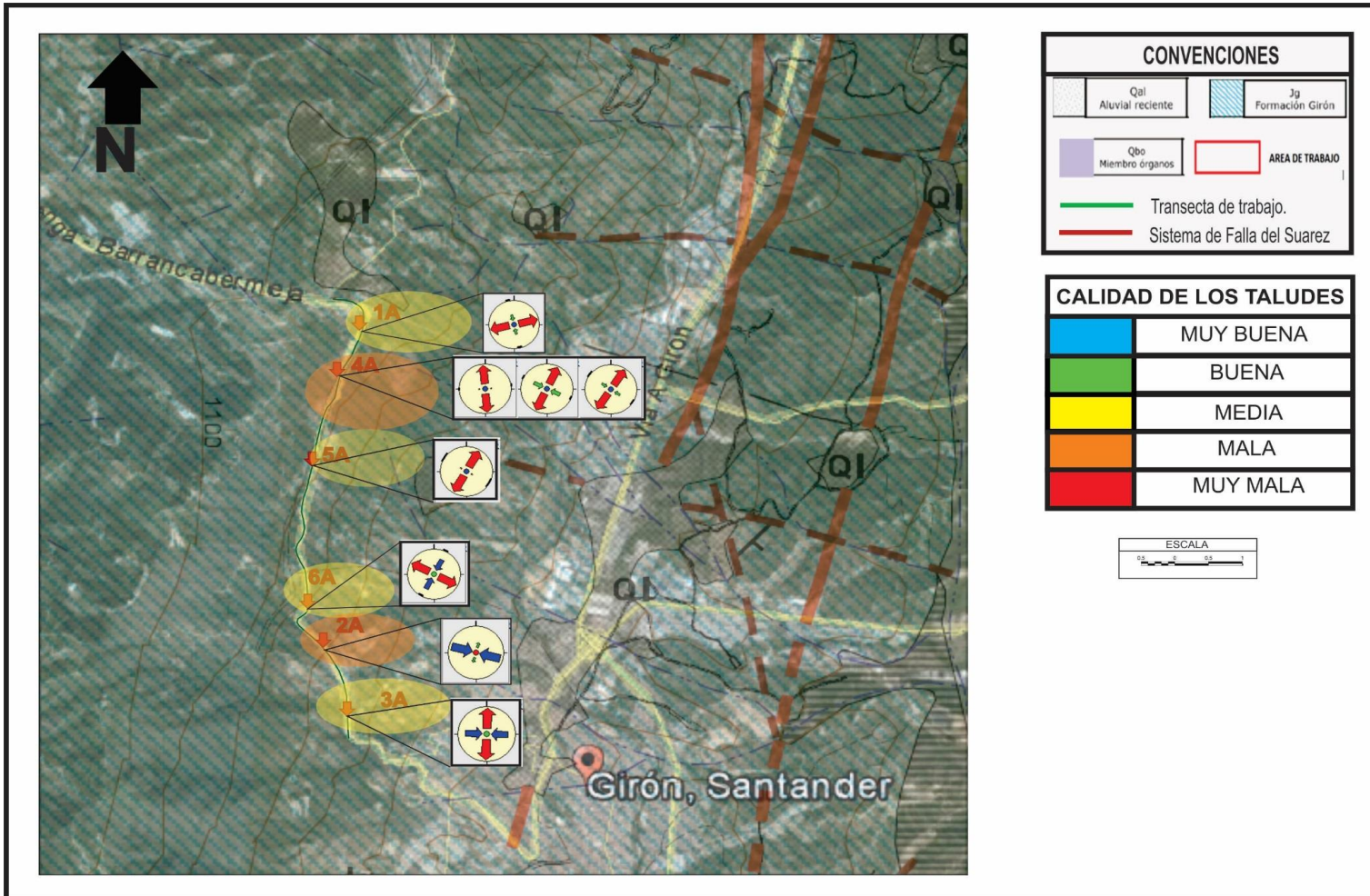
Figura 33. Afloramiento 6. a. Datos estructurales en Stereonet en él se muestran los planos y sus respectivos polos. b. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 10 rumbos de los planos obtenidos en campo de las 3 familias de Diaclasas. c. Datos del afloramiento 6. Diagrama de Rosetas, se evidencian los 10 buzamientos de los planos de las 3 familias de Diaclasas. d. Circulo de MOHR. e. Dirección de los esfuerzos principales. Tomado y modificado de Win-Tensor. Delvaux y Sperner (2003).



Se dividió en 3 zonas, se obtuvieron 3 familias de Diaclasas que a su vez brindaron 10 datos estructurales de rumbo y buzamiento de las principales familias de diaclasas. En esta grafica obtenida por el procesamiento de los datos en el software libre Win-Tensor se evidencian los 10 Planos y los respectivos Polos de las 3 familias de diaclasas, obtenidas en campo y plasmadas en la plantilla de Schmidt. En el Círculo de MOHR, se puede apreciar que todos los datos están por

encima del límite de deformación frágil dúctil tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, mostrando un comportamiento frágil que caracteriza a este macizo en general. Las principales direcciones de los esfuerzos sigma 1, sigma 2 y sigma 3; indican que predominan los esfuerzos compresivos y extensivos, El resultado nos muestra que el sigma 1 y el sigma 2 están generando esfuerzos compresivos; mientras que el sigma 3 está generando esfuerzos extensivos, siendo este 3 el esfuerzo más representativo. El resultado obtenido del software libre Win-Tensor, se comparó con los datos obtenidos en campo, y se verificó la actuación de esfuerzos compresivos y extensivos, siendo el esfuerzo los últimos la principal fuerza que actúa sobre este macizo.

Figura 34. Mapa del análisis geomecánico. Se observa el estado de los taludes junto con los esfuerzos que está actuando sobre estos.



6. CONCLUSIONES

- Los datos obtenidos en campo de todos los afloramientos trabajados son homogéneos pero no obstante el comportamiento de cada uno difiere ya sea por los esfuerzos que los controlan o su grado de exposición.
- Según el RMR calculado para los taludes del área de estudio la calidad de las rocas que lo conforman varía de regular a mala, motivo por el cual se deben tomar medidas para controlar la erosión de los mismos.
- Según el SMR calculado en los taludes de los afloramientos 1 y 3 se encontró que cuentan con una estabilidad **normal**, pero no se debe descartar la idea de tomar medidas para control como zanjas o vallas de pie sobre la superficie del talud. Para el caso del afloramiento 2 que cuenta con una **mala** estabilidad es necesario realizar refuerzos para evitar el colapso del mismo, ya sea con el uso de anclajes o bulones.
- Los taludes analizados se encuentran por encima del límite de deformación frágil-dúctil tomando un rol de fractura reactivada en su totalidad, a excepción de 3 datos estructurales del afloramiento 1A que presentan un rol de fractura no activa. Así mismo en ellos se pueden apreciar esfuerzos de tipo compresivos y extensivos; siendo estos últimos los que controlan el área de estudio.

7. RECOMENDACIONES

- Para los taludes que cuentan con **mala** clasificación de RQD y RMR es necesario disminuir la inclinación del talud perfilándolo, y eliminar peso de sus coronas.
- Para los taludes con clasificación **media** de RQD, mala y regular de RMR es necesaria la construcción de muros de contención que aumenten el peso en sus pies.
- Para los taludes con un SMR **normal** se recomienda realizar obras de escalonamiento o bermas con el fin de hacer control a la erosión evitando y evitar el aumento en sus inclinaciones.
- Para los taludes con un SMR malo se recomienda disminuir su inclinación y peso en sus coronas y aumentar el peso en sus pies mediante el uso de gaviones.
- Se recomienda a la hora de intervenir cada uno de los taludes realizar obras de control pluvial ya que la gran actividad erosiva que presentan los taludes del área de estudio corresponde a la generada por las precipitaciones en épocas de invierno.
- Se recomienda no realizar actividades de tipo industrial por lo menos a 1km de radio del área de estudio ya que las vibraciones generadas por su trabajo causarían a mediano plazo la alteración de los taludes analizados.

BIBLIOGRAFIA

BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. In exploration for rock engineering, proc. Of the symp. Pages 97-106. 1976

CATALÁN J. Geología estructural y dinámica global. Departamento de Geología, España, Universidad de Salamanca, Caps. 2 y 3. 2003

CEDIEL, F. «Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental.» Boletín Geológico Vol. 16 No 1-3: 5 – 96. 1968

DELVAUX, D. Win-Tensor, software gratuito, 5 ed. Versión 2.2. Museo Real de África Central, Tervuren, Bélgica. 2010.

GONZALEZ DE VALLEJO. Luis *et al.* Ingeniería Geológica. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p. 1985.

HOEK E, BRAY J.W., (1999). Rock Slope Engineering, 3ª Edición. Institution of Mining an Metallurgy. Londres.

HERRERA R., Fernando. Guía de Cálculo de Estabilidad de Talud. Madrid. Capítulo 1; Página 6. 2002

INGEOMINAS. Mapa Geológico, Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, Escala 1:25000, Bogotá. 2001.

INGEOMINAS. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Subdirección de Amenazas Geoambientales. Bogotá. 2001

JULIVERT, M. Geología de la vertiente W de la Cordillera Oriental en el sector de Bucaramanga: Univ. Indus. De Santander (Colombia) Bol. De Geología, no.8, p 39-42. 1961.

PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE SAN JUAN DE GIRÓN. Proyecto de Acuerdo No XX del 2010. Centro de Estudios Regionales –UIS, p 6-65. 2010.

ROCSCIENCE Inc. DIPS, free software. Plotting, Analysis and Presentation of Structural Data Using Special Projection Techniques User's Guide. 1989-2002.

TERZAGHI, K. Rock defects on loads on tunnel supports. In rock tunneling with steel supports, pages 17-99. 1946

WARD, Dwight; GOLDSMITH, Richard; CRUZ, Jaime; RESTREPO, Hernán. «Geología de los cuadrangulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona Departamento de Santander». Boletín Geológico, Volumen XXI. No 1-3. 1973

ANEXOS

(Ver documentos adjuntos)