

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN



ANÁLISIS DE MACIZOS ROCOSOS PREVIO AL DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL
POJOM, HUEHUETENANGO

MARIO BERNARDO DAETZ ESCALANTE

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN,
ANÁLISIS DE MACIZOS ROCOSOS PREVIO AL DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL
POJOM, HUEHUETENANGO

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

MARIO BERNARDO DAETZ ESCALANTE
CARNÉ 200041599

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2017

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Alvarado Guillermo Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE: Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales

SECRETARIO: Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey

REPRESENTANTE DE DOCENTES: Lcda. T.S. Floricelda Chiquín Yoj

REPRESENTANTE DE EGRESADOS: Lic. Admón. Fredy Fernando Lemus Morales

REPRESENTANTES ESTUDIANTILES: Br. Fredy Enrique Gereda Milián
PEM. César Oswaldo Bol Cú

COORDINADOR ACADÉMICO

Ing. Ind. Francisco David Ruiz Herrera

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geól. Sergio David Morán Ical

COMISIÓN TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR: Ing. Geól. Ricardo Enrique Milián de la Cruz

SECRETARIO: Ing. Geól. Edwin Orlando Yash Asencio

VOCAL: Ing. Geól. Silvia Friné Cortez Bendfeldt

REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO

Ing. *M.Sc.* Julio Enrique Reynosa Mejía

REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun

ASESOR

Ing. *M.Sc.* Bernie Gamaliel Castillo Moeschler

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**
Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX: 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e.: geologiausac@gmail.com

09 de mayo de 2016

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. MARIO BERNARDO DAETZ ESCALANTE**, carné n.º **200041599**, titulado: **“ANÁLISIS DE MACIZOS ROCOSOS PREVIO AL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL POJOM, HUEHUETENANGO”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. M. Sc. Bernnie Gamaliel Castillo Moeschler
Docente Asesor
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**
Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX: 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e.: geologiausac@gmail.com

Ref. 15-CG-52/2017
06 de febrero de 2017

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. MARIO BERNARDO DAETZ ESCALANTE**, carné n.º **200041599**, titulado: **“ANÁLISIS DE MACIZOS ROCOSOS PREVIO AL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL POJOM, HUEHUETENANGO”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun
~~Docente Revisor~~
Carrera Geología
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**
Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX: 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e.: geologiausac@gmail.com


Ref. 15-CG-56/2017
20 de febrero de 2017

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“ANÁLISIS DE MACIZOS ROCOSOS PREVIO AL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL POJOM, HUEHUETENANGO”**, realizado por el (la) T.U. **GEÓL. MARIO BERNARDO DAETZ ESCALANTE**, carné n.º **200041599**, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. M. Sc. **Enrique Reynosa Mejía**
Comisión Redacción y Estilo
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación titulado: "Análisis de macizos rocosos previo al diseño y construcción del proyecto hidroeléctrico El Pojom, Huehuetenango", como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo.



Mario Bernardo Daetz Escalante
Carné No. 200041599

RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: Del estudiante que opta al título, del asesor y del revisor; la Comisión de Redacción y Estilo de cada carrera, es la responsable de la estructura y la forma”.

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2 .4, subinciso 2.4.1 del Acta No.17-2012 de Sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio del año 2012

DEDICATORIA A:

MI MADRE

Por todo su apoyo y amor

MI HERMANO

Por contar con su colaboración

TÍA Y PRIMOS

Por su cariño

MIS MAESTROS

Por brindarme todos sus conocimientos

MIS AMIGOS

Por su ayuda y amistad

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo realizado en la aldea Ixquisis, en el cual participaron diferentes personas opinando, corrigiendo, dando ánimos, acompañándome en los momentos tensos que hubo, permitiendo aprovechar la competencia y experiencia que deseo agradecer.

En primer lugar a HIDRALIA ENERGÍA DE GUATEMALA, ECOSISA Y PDH (Promotora de Desarrollo Hídrico S.A.) por haberme recibido en su grupo de profesionales, por sus consejos, apoyo que me brindaron durante mi estancia donde he podido tener la oportunidad de aprender.

A la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de Geología, en especial al Ingeniero Geólogo Bernie Castillo por brindarme su asesoría y consejos de cómo era la mejor manera de enfocar el trabajo.

Todo esto no hubiera sido posible sin el amparo y cariño que me inspiró mi madre, que de forma incondicional entendió mis malos momentos y a pesar de todo siempre estuvo a mi lado para saber cómo iba mi proceso. Las palabras nunca serán suficientes para testimoniar mi aprecio y mi agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	Página
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	xiii
	1

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	3
1.3 Hipótesis	4
1.4 Alcance y límite	4
1.4.1 Alcance	4
a. Alcance descriptivo-exploratorio	4
1.4.2 Límites	5
a. Límites: espacial y temporal	5
1.5 Objetivos	5
1.5.1 General	5
1.5.2 Específicos	5
1.6 Antecedentes	6
1.7 Localización y extensión	7
1.7.1 Localización geográfica	7
1.7.2 Localización cartográfica	8
1.7.3 Extensión	8
1.7.4 Vías de acceso	9
1.8 Clima y vegetación	10
1.9 Precipitación	13

1.10 Zonas de vida	14
1.11 Drenaje	15
1.12 Fisiografía	16
1.13 Suelos	17
1.14 Estabilidad y vulnerabilidad de laderas	19

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

2.1 Generalidades	21
2.2 Marco metodológico	21
2.2.1 Etapa de recopilación y análisis bibliográfico	21
2.2.2 Etapa de campo	22
2.2.3 Etapa de gabinete	22
2.3 Metodología	23
2.3.1 Caracterización geomecánica	23
a. Clasificación de Bieniawski o sistema <i>RMR (Rock Mass Rating)</i>	23
1) Resistencia de la Matriz Rocosa (MPa)	23
2) <i>RQD</i> (Designación de la calidad de la roca)	24
3) Separación entre diaclasas	25
4) Naturaleza de las discontinuidades	26
5) Meteorización	28
6) Agua freática	29
7) Obtención del <i>RMR</i> básico	30
8) Corrección por la orientación de las discontinuidades	31
b. Clasificación geomecánica de Romana o sistema <i>SMR (Slope Mass Rating)</i> para taludes	34
2.3.2 Tipos de mecanismos de falla en taludes	39
a. Rotura planar	40
b. Rotura en cuña	41
c. Falla por volteo	43
d. Rotura circular	46
2.3.3 Análisis de estabilidad para mecanismos de rotura en taludes	47
a. Análisis de estabilidad de taludes rocosos por proyección estereográfica	48

b. Análisis estadístico de discontinuidades	49
c. Análisis de la estabilidad con el concepto del círculo de fricción	50
1) Análisis de estabilidad para mecanismo planar	51
2) Análisis de estabilidad para mecanismo en cuña	52
3) Análisis de seguridad para mecanismo por vuelco	57

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Resultados	61
3.1.1 Litología	61
a. Unidad de Lutitas	61
b. Unidad de Calizas	63
c. Unidad de Depósitos Aluviales	66
3.1.2 Contactos estratigráficos y relación espacial de las unidades	68
3.1.3 Geología estructural	72
a. Planos de fracturas	72
b. Planos de estratificación	74
3.1.4 Ubicación de macizos rocosos	76
3.1.5 Resistencia de la roca	78
3.1.6 Caracterización geomecánica	81
a. Clasificación de Bienawski (1 989) o sistema <i>RMR</i>	81
b. Clasificación de Romana o sistema <i>SMR</i>	84
3.1.7 Ángulo de fricción	89
3.1.8 Mecanismos de rotura	90
3.1.9 Análisis de estabilidad para mecanismos de rotura en taludes	100
3.2 Discusión de resultados	108
3.3 Resistencia de la matriz rocosa	108
3.3.1 Clasificación <i>RMR</i> de Bieniawski	108
3.3.2 Clasificación de Romana o sistema <i>SMR</i>	115
3.3.3 Mecanismos de rotura y factor de seguridad	120
3.4 Mecanismos de protección y sostenimiento	128
3.4.1 Minimizar las caídas de rocas	128
a. Cercas para contención de rocas muros de concreto y diques	130

b. <i>Scaling y trimming</i>	131
c. Hormigón proyectado	132
3.4.2 Aumentar la seguridad del talud	133
a. Minimizar o anular la entrada de agua de escorrentía al talud	133
b. Corrección del talud	134
CONCLUSIONES	145
RECOMENDACIONES	147
BIBLIOGRAFÍA	149

ANEXOS

I Tablas de campo Parámetros Geomecánicos para la Clasificación <i>RMR</i>	153
II Resultados Clasificación <i>RMR</i> Estaciones Geomecánicas	169
III Estereogramas	185
IV Identificación de las Roturas en roca de las Estaciones Geomecánica	189
V Mecanismos de Rotura Planar	193
VI Mecanismos de Rotura en Cuña	195
VII Mecanismos de Rotura en Vuelco	199
VIII Aureola de Resurgimiento Mecanismos Planares	203
IX Mapa Geológico del proyecto	
X Mapa de la Clasificación <i>RMR</i>	
XI Mapa de la Clasificación <i>SMR</i>	

ÍNDICE DE CUADROS

1 Resistencias a partir de Índices de Campo	24
2 Clasificación para separación de diaclasas (<i>ISRM</i> , Bieniawski)	26
3 Longitud de las Discontinuidades	26
4 Abertura de las Discontinuidades	27
5 Rugosidad en Discontinuidades	28
6 Clasificación del grado de Meteorización de Macizos Rocosos (<i>ISRM</i>)	29
7 Descripción de las Filtraciones	30
8 Clasificación Geomecánica <i>RMR</i> básico	31
9 Corrección de <i>RMR</i> para Taludes	32

10 Corrección por la Orientación de las Discontinuidades	33
11 Clasificación Índice de Calidad <i>RMR</i>	33
12 Clasificación Índice de Calidad <i>RMR</i> y sus consideraciones geotécnicas	34
13 Factores de Ajuste para la Orientación de las juntas	37
14 Factor de Ajuste según el Método de Excavación	38
15 Clases de Estabilidad según el <i>SRM</i> (Romana 1 985)	39
16 Resistencia de la Matriz Rocosa	79
17 Clasificación Geomecánica <i>RMR</i>	81
18 Correcciones <i>RMR</i> para Taludes	83
19 Factores de Seguridad obtenidos a partir de los Mecanismos de Rotura	107

ÍNDICE DE TABLAS

1 Coordenadas <i>UTM</i> en Sistema WGS 84 del área de estudio	8
2 Características de las Estaciones Geomecánicas	78
3 Plantilla para toma de datos utilizada en el cálculo del <i>RMR</i>	82
4 Resultados <i>RMR</i> obtenidos para las Estaciones Geomecánicas	84
5 Porcentajes de Calidad <i>RMR</i> de los Macizos Rocosos	84
6 Resultados <i>SMR</i> obtenidos para las Estaciones Geomecánicas	89
7 Porcentaje de Calidad <i>SMR</i> de los Macizos Rocosos	89
8 Ángulo de Fricción Interna estimado	90
9 Mecanismos de Rotura encontrados con posibilidad de ocurrencia	91
10 Factores de Seguridad para el Mecanismo Planar localizados en las Estaciones Geomecánicas	102
11 Factores de Seguridad para el Mecanismo de Cuñas encontrados en las Estaciones Geomecánicas utilizando los Ángulos θ_i y θ_t	103
12 Factores de Seguridad para el Mecanismo de Cuñas encontrados en las Estaciones Geomecánicas utilizando los Ángulos E y B	104
13 Factores de Seguridad para Mecanismos de Vuelco presentes en las Estaciones Geomecánicas	106
14 Porcentaje de Clasificación de roca en base a la Resistencia de la Matriz	108
15 Estabilidad de Taludes a partir de la Clasificación <i>SMR</i>	117
16 Métodos correctivos para aumento de Estabilidad de Taludes a partir de Valores del <i>SMR</i>	118
17 Comprobación de enunciados para el Mecanismo de Rotura Planar	120
18 Comprobación de enunciados para el Mecanismo de Rotura en Cuña	121

19 Comprobación de nunciados para el Mecanismo de Rotura en Vuelco	122
20 Comprobación Cinemática de Goodman y Bray para el Mecanismo de Rotura en Vuelco	122
21 Mecanismos con posibilidad de Falla	124
22 Estaciones Geomecánicas a las cuales se puede aplicar un sostenimiento contra Caídas de Rocas	130
23 Corrección de Taludes Mecanismo Planar	140
24 Corrección de Taludes Mecanismo de Cuñas	141
25 Corrección de Taludes Mecanismo de Vuelco	142

ÍNDICE DE FIGURAS

1 Ubicación y Extensión del área de estudio	9
2 Vías de Acceso al área de estudio	10
3 Rotura Planar en Taludes	41
4 Rotura en Cuña	42
5 Fallas de Volteo	43
6 Esquema general de la Falla por Volteo	44
7 Análisis Cinemático de la Falla de Volteo	45
8 Forma de un típico Deslizamiento Circular	47
9 Análisis Estadístico densidad de polos generado con <i>Stereonet</i>	49
10 Representación Estereográfica para cada una de las Fallas posibles en roca	50
11 Representación del Cono de Fricción correspondiente a una superficie de deslizamiento y su representación Estereográfica	52
12 Representación de los Conos de Fricción sobre los planos de la Cuña	53
13 Representación Estereográfica para el Análisis de Cuñas	55
14 Ángulos E y B para el cálculo del Factor de Seguridad del Mecanismo de Rotura en Cuña	56
15 Condiciones que determinan la Estabilidad del bloque	58
16 Columnas Estratigráficas generalizadas	69
17 Relaciones entre Unidades Estratigráficas Laterales	71
18 Diagrama de Rosas de los planos de fracturas en Calizas y Lutitas	72
19 Diagrama de Rosas de los planos de fractura en Unidad de Calizas	73
20 Diagrama de Rosas de los planos de fractura en Unidad de Lutitas	74
21 Polos y Densidades de Estratificación	75
22 Dirección Eje de Pliegue	75

23 Estereograma de la EG 11 con los Mecanismos de Rotura	86
24 Estereograma de la EG 2 con los Mecanismos de Rotura	92
25 Mecanismo Planar Estación Geomecánica 2 (EG 2)	94
26 Estereograma de la EG 9 con los Mecanismos de Rotura	95
27 Polos de fracturas y Dirección del talud Estación Geomecánica 9 (EG 9)	96
28 Estereograma con el punto de Intersección <i>i</i> de los planos que conforman la Cuña	97
29 Estereograma de la EG 1 con los Mecanismos de Vuelco	98
30 Mecanismos de Vuelco de la Estación Geomecánica 1 (EG 1)	100
31 Datos de la Estación Geomecánica 2 (EG 2)	101
32 Resultados gráficos de la Calidad Geotécnica <i>RMR</i>	109
33 Cantidad de Estaciones Geomecánicas vrs Resistencia de la Matriz Rocosa	111
34 Cantidad de Longitud de Discontinuidades presentes en las Estaciones Geomecánicas	112
35 Cantidad de Aberturas presentes en las Estaciones Geomecánicas	113
36 Cantidad de Rugosidades presentes en las Estaciones Geomecánicas	114
37 Presencia de Agua Freática en las Discontinuidades de las Estaciones Geomecánicas	115
38 Resultados gráficos de la Calidad Geotécnica <i>SMR</i>	116
39 Resultados gráficos de cantidades de Mecanismos con posibilidad de Falla	123
40 Factores de Seguridad para los Mecanismos de Rotura Planar	125
41 Variación del Factor de Seguridad con respecto a la Inclinación de la Cuña	127
42 Curvas del Factor Seguridad para el Mecanismo de Rotura en Vuelco	128
43 Aureola de Resurgimiento, Ángulo de Fricción y Talud (EG 9)	136
44 Diagrama Estereográfico con el Ángulo de Corte para la Estación Geomecánica 9 (EG 9)	137
45 Ábaco de Modificación del Talud, en función del Ángulo de Fricción Interna vrs la Inclinación del Talud para el Mecanismo de Rotura Planar	138
46 Ábaco de Modificación del Talud, en función del Ángulo de Fricción Interna vrs la Inclinación del Talud para el Mecanismo de Rotura en Cuña	139
47 Ábaco de Modificación del Talud, en función del Ángulo de Fricción Interna vrs la Inclinación del Talud para el Mecanismo de Rotura en Vuelco	141
48 Modificación de Taludes a partir del Factor de Seguridad 1,3 para los Taludes del proyecto	143

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

1 Unidad de Lutitas en el Pojom	62
2 Calicata realizada en la Unidad de Lutitas, sitio Casa de Máquinas	63
3 Unidad de Calizas estratificadas sin disolución en el sitio de Presa Pojom	64
4 Brechas Carbonáticas en el área del proyecto Pojom	65
5 Unidad Aluvional en el área del proyecto Pojom	67
6 Unidad Aluvional localizada en margen izquierda del Río Pojom	67
7 Colocación de Enmallado para evitar Caídas de Rocas	129
8 Estructuras de Contención para Caídas de Rocas	131
9 <i>Scaling</i> y <i>Trimming</i> en Taludes rocosos	132
10 Recubrimiento del Talud con Hormigón Proyectado (<i>Shotcrete</i>)	133

ÍNDICE DE MAPAS

1 Mapa de Climas según la Clasificación de Thornwaite	12
2 Isoyetas Promedio Anual	13
3 Zonas de Vida Holdridge	14
4 Delimitación de la Subcuenca del Río Pojom	15
5 Provincias Fisiográficas de Guatemala	16
6 Mapa de Suelos con la extensión de la Serie Quixtan	19
7 Mapa Geológico	70
8 Ubicación de Estaciones Geomecánicas	77
9 Clasificación de la Roca en base a Parámetros de Resistencia de la Matriz	80
10 Zonificación de la Calidad <i>RMR</i>	110
11 Mapa de Clasificación <i>SMR</i>	119

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Al.	Aluvión
Cm	centímetros
Cz.	Caliza
<i>E</i>	<i>East</i>
FS	Factor de Seguridad
FTN	Franja Transversal del Norte
<i>ISRM</i>	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
km	kilómetros
km ²	kilómetros cuadrados
Lt.	Lutita
m	metros
mm	milímetros
MPa	Megapascuales
msnm	metros sobre el nivel del mar
N	Norte
<i>N</i>	<i>North</i>
n	número de datos
<i>RMR</i>	<i>Rock Mass Rating</i>
<i>RQD</i>	<i>Rock Quality Design</i>
<i>S</i>	<i>South</i>
<i>SMR</i>	<i>Slope Mass Rating</i>
<i>UTM</i>	<i>Universal Transverse Mercator</i>
<i>W</i>	<i>West</i>
<i>WGS</i>	<i>World Geodetic System</i>

RESUMEN

El problema principal de la investigación fue determinar la calidad geotécnica de los macizos rocosos; se hizo en base a los sistemas *RMR* (*Rock Mass Rating*) y el *SRM* (*Slope Mass Rating*); posteriormente con los resultados se propusieron algunas medidas de corrección para los taludes.

En el área se localizaron tres unidades litológicas, la más predominante fue la Unidad de Calizas, seguido por la Unidad de Aluvión y por último la Unidad de Lutitas. En las unidades de Caliza y Lutita se observaron cinco familias de fracturamiento; tres principales con direcciones preferenciales las siguientes: 1. $N40^{\circ}$; 2. $N75^{\circ}$; 3. $N285^{\circ}$; más dos secundarias, 4. $N330^{\circ}$ y 5. $N10^{\circ}$. Las estratificaciones localizadas en las estaciones geomecánicas mostraron un plegamiento con eje de dirección $N323^{\circ}/32^{\circ}$ y esfuerzos compresivos con orientación al $N233^{\circ}$.

Los resultados del *RMR* permitieron clasificar la zona en tres tipos de calidad geotécnica así: clase III o calidad media con 7 estaciones geomecánicas, calidad IV o mala con 5 estaciones geomecánicas y clase V o muy mala con 3 estaciones. Con el sistema *SMR* se establecieron al igual que el sistema *RMR* tres zonas con la siguiente calidad geotécnica: normal, mala y muy mala; se contabilizaron 9 estaciones geomecánicas de clase III (calidad normal), 4 estaciones geomecánicas clase IV (calidad mala) y 2 estaciones clase V (calidad muy mala).

Con el uso de diagramas estereográficos se identificaron las familias de fracturación, (mecanismos de roturas que afectan a los macizos rocosos) el mecanismo de vuelco es el que tiene más predominancia en el área. Para los análisis cinemáticos de los mecanismos de rotura se utilizaron las

comprobaciones de Hoek y Bray para determinar si los movimientos eran posibles en las roturas planares y de cuña y la propuesta por Goodman y Bray en el mecanismo de rotura en vuelco.

Para el cálculo del factor de seguridad se estableció que factores mayores a 1,3 son estables y menores a 1,3 inestables, basado en las normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala.

Para evitar caídas de rocas en los taludes se recomienda el uso de malla con refuerzo, hormigón proyectado, *scaling* y *trimming*, y algunas estructuras de contención; para el aumento de seguridad en el talud la construcción de zanjas de coronación y la corrección del talud por medio del análisis del círculo de falla o aureola de resurgimiento o bien el uso de los ábacos de corrección a partir del factor de seguridad requerido en la obra.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la investigación de sitios potenciales para proyectos hidroeléctricos, es de vital importancia el conocimiento de las condiciones geotécnicas y geológicas alrededor del área, con el objeto de minimizar las complicaciones constructivas que puedan surgir a partir de estas, como taludes inestables, rocas con baja resistencia o arcillosas, durante y después de la construcción de las obras civiles.

Estructuras como azudes, embalses, tuberías de conducción y casas de máquinas deberán ser planificadas y emplazadas en aquellos sitios con las mejores condiciones topográficas y geológicas o en su defecto, las condiciones desfavorables deberán ser detectadas y definidas para diseñar las medidas de mitigación necesarias.

La evaluación de macizos rocosos se refiere a la compilación de información y datos para construir un modelo conceptual completo de la roca en la cual se identifican y definen todas las variables geológicas que pueden determinar la estabilidad de las obras civiles, así como las propiedades físicas de estas variables.

El informe inicia con datos generales sobre el planteamiento y justificación del problema, además se presenta la hipótesis de trabajo, los alcances, objetivos, antecedentes bibliográficos y de investigaciones realizadas en otros proyectos; se complementa la información con la ubicación geográfica y fisiografía física.

En el siguiente capítulo Metodología se explica la metodología utilizada para el análisis de macizos rocosos por medio de la clasificación

geomecánica de Bieniawski, al identificar los mecanismos de rotura planar, cuña y vuelco y sus respectivos análisis de estabilidad para taludes.

En el capítulo tres se presentan los resultados de los hallazgos litológicos y estructurales del área, los análisis y resultados de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, el análisis de estabilidad para mecanismos de rotura en taludes por medio de la identificación de las familias de discontinuidades; se finaliza con propuestas factibles de medidas de remediación de taludes.

El informe termina con las conclusiones que se obtuvieron tras realizar la investigación y las recomendaciones que se creyeron oportunas para su aplicación en futuras investigaciones sobre macizos rocosos previo al diseño y construcción de proyectos hidroeléctricos.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Planteamiento del problema

El problema planteado es:

¿Cuáles son los parámetros geomecánicos óptimos del *RMR*, y calidad de los macizos rocosos en el proyecto El Pojom?

1.2 Justificación

A partir del año 1996 fue la promulgación de la Ley General de Electricidad que ha promovido la apertura del mercado eléctrico y como consecuencia la oferta de generación de energía eléctrica se ha incrementado con la generación de varios estudios para pequeñas centrales hidroeléctricas por todo el país.

La caracterización apropiada de los macizos rocosos, además de ser factor principal para el diseño de obras hidráulicas, proporciona conocimiento técnico de manera cuantitativa, se determina así la calidad geotécnica de un macizo rocoso que permite la distinción entre un macizo y otro de manera rápida y fácil.

En este sentido se establecen los parámetros que facilitan o impiden el desarrollo de cada uno de los componentes del proyecto y las diversas opciones de desarrollo.

La evaluación de macizos rocosos utilizada para el presente estudio es la clasificación geomecánica de Bieniawski, o sistema *Rock*

Mass Rating (RMR), desarrollada originalmente para la excavación de túneles, en años recientes ha sido ampliamente aplicado en el diseño primario de taludes de roca y cimentaciones, así como para estimación *in-situ* del módulo de deformación y la resistencia de los cuerpos rocosos. Este sistema es ampliamente utilizado por su versatilidad, ya que utiliza seis parámetros que pueden ser fácilmente determinados en el campo.

1.3 Hipótesis

La clasificación de macizos rocosos por el método *Rock Mass Rating (RMR)* de Bieniawski puede tener un índice de calidad geotécnica bajo que repercute en la estabilidad de taludes, por lo que sería necesario el empleo de medidas correctivas para mejorar su estabilidad.

1.4 Alcance y límite

1.4.1 Alcance

a. Alcance descriptivo-exploratorio

Se describió la roca en afloramientos encontrados en el área de estudio, basándose en los seis parámetros geomecánicos utilizados por el método *RMR* para determinar la clasificación del macizo rocoso, los cuales son:

1. Resistencia de la roca intacta.
2. (*RQD*) Designación de la calidad de la roca
3. Espacio de las discontinuidades
4. Condición de las discontinuidades
5. Condiciones hidrológicas
6. Ajuste por orientación de las juntas

1.4.2 Límites

a. Límites: espacial y temporal

El estudio se programó para realizarse durante seis meses, en un área de 15 km² a escala 1:20 000 para la obtención de un mapa lito-estructural, se cubrieron 4,45 km para la descripción de las estaciones geomecánicas que fueron plasmadas en un mapa a escala 1: 15 000. (Ver Anexo X)

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Evaluar los resultados de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos y su diferenciación, así como las soluciones constructivas en un tramo longitudinal de 4,45 km a escala 1:15 000 en un área de 15 km².

1.5.2 Específicos

- a) Clasificar geomecánicamente el macizo rocoso por medio de la clasificación geomecánica de Bieniawski.
- b) Medir los parámetros geomecánicos establecidos por la clasificación de macizos rocosos por el método *Rock Mass Rating (RMR)*.
- c) Determinar los posibles mecanismos de rotura que puedan influir en la estabilidad de los taludes en los sitios que presenten riesgos constructivos.
- d) Proponer medidas de mitigación en los tramos identificados con mecanismos de rotura en los macizos rocosos.

- e) Generar un mapa lito-estructural como complemento de la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en el proyecto “El Pojom”.

1.6 Antecedentes

El primer sistema de clasificaciones en macizos rocosos fue propuesto por Terzaghi en 1946 convirtiéndose en el primer aporte a las investigaciones geomecánicas, seguida por otras clasificaciones que surgieron como modificaciones a la anterior, y de las cuales para este proyecto se tendrá en cuenta la clasificación propuesta por Bieniawski.¹

Este método permite de forma sencilla, estimar la calidad del macizo rocoso, mediante la cuantificación de parámetros de fácil medición, los cuales se establecen de manera rápida y costos económicos mínimos, cuyos resultados se tienen en cuenta al momento de hallar la estabilidad de los taludes que resultan desfavorables.

El estado actual del conocimiento en mecánica de rocas, así como la definición y obtención de parámetros y adopción de modelos que representen el comportamiento real de los macizos rocosos, se encuentra en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de ingeniería, como consecuencia de esto, resulta difícil establecer modelos analíticos del comportamiento del macizo rocoso que sean reflejo fiel de este, cuando se trata de resolver problemas de estabilidad o dimensionamiento de obras a cielo abierto o subterráneo.

¹ Richard ZT Bieniawski. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual For Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York, United States of America: Wiley-Interscience, 1989. 87.

Se tiene como soporte investigaciones como la realizada por Munir, K, Farooq and H. Mujtaba. “*A comparative Analysis of Rock Mass Classification systems for hydropower projects of Pakistan*” la cual consta en utilizar diferentes sistemas de clasificación de macizos rocosos, para la presa Diamer Basha y *Kohala Hydropower Project*, los cuales son indicadores de la calidad del macizo rocoso.²

El ingeniero en puertos, canales y caminos José María Alegre, en su estudio de *Caracterización geológica y geotécnica del proyecto hidroeléctrico “El Tuma La Dalia”* describe los seis parámetros utilizados y los valores resultantes del *RMR* de Bieniawski, establece así criterios constructivos para el proyecto.³

Alan Geovani Cosillo Pinto en la tesis de grado de ingeniería civil, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la cual consta de recopilaciones bibliográficas de conceptos y ejercicios para determinar el diseño de taludes, con métodos de clasificación geomecánica de macizos rocosos que tienen las mismas variables, criterios y similitudes utilizadas por Bieniawski.⁴

1.7 Localización y extensión

1.7.1 Localización geográfica

El área de estudio se localiza en la aldea Ixquisis, en el municipio de San Mateo Ixtatán, Huehuetenango, limítrofe con el estado mexicano de Chiapas.

² Munir, K, Farooq and H. Mujtaba. “*A comparative Analysis of Rock Mass Classification systems for hydropower projects of Pakistan*” *Pakistan Journal of Science*. Vol. 65 Issue 1, March 2013.

³ José María Alegre. *Caracterización geológica y geotécnica del proyecto hidroeléctrico El Tuma La Dalia*. El Tuma, Matagalpa, Nicaragua: Hidralia Energía. 2011.

⁴ Alan Cosillo Pinto. *Consideraciones geológico-geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1999.

1.7.2 Localización cartográfica

Se ubica dentro de la hoja topográfica Río Seco (1 964III) Serie E754 con *Datum NAD-27* zona 15N. Las siguientes coordenadas limitan el área de estudio y se muestran en la tabla 1.

TABLA 1
COORDENADAS *UTM* EN SISTEMA WGS 84 DEL ÁREA DE ESTUDIO

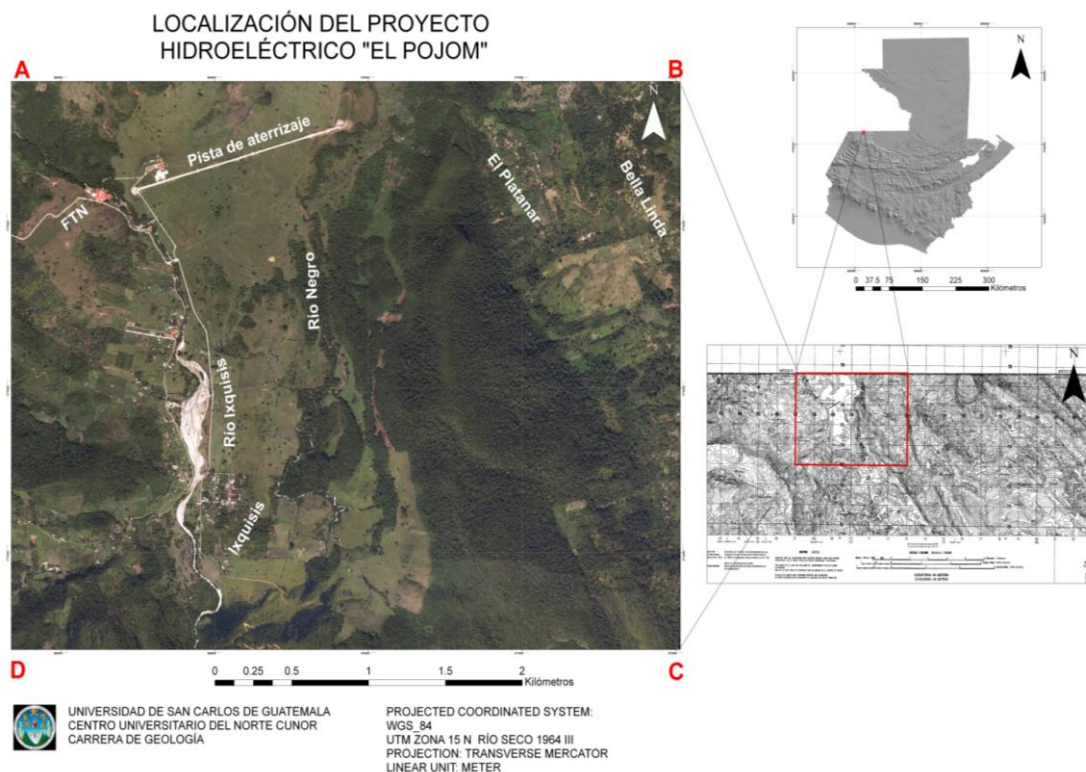
COORDENADAS <i>UTM</i> DEL ÁREA DE ESTUDIO		
VERTICE	ESTE	NORTE
A	⁶68000	¹⁷77000
B	⁶73000	¹⁷77000
C	⁶73000	¹⁷74000
D	⁶68000	¹⁷74000

Fuente: Elaboración propia en base hoja topográfica 1 964 III Río Seco.

1.7.3 Extensión

La extensión del área estudiada es de 15 km² los cuales abarcaron sitios de emplazamiento de las obras y sus alrededores. (Figura 1)

FIGURA 1 UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



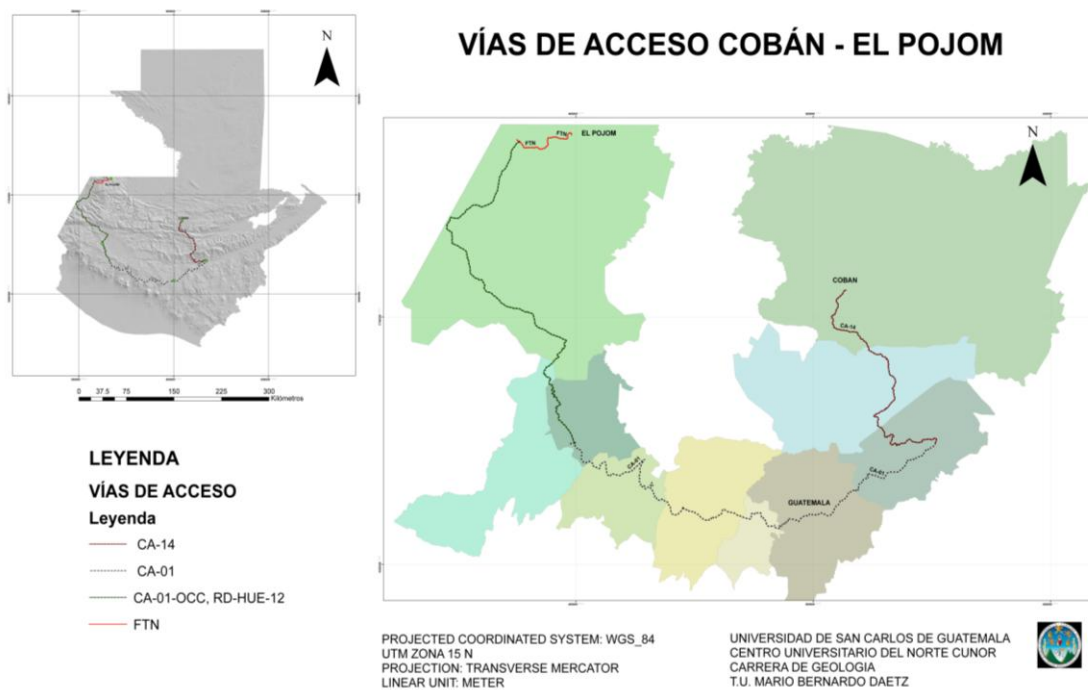
Fuente: Elaboración propia en base a hoja topográfica 1 964 III Río Seco.

1.7.4 Vías de acceso

Para llegar al área de estudio desde Cobán se tiene que recorrer un aproximado de 596 km entre carreteras asfaltadas y de terracería por la ruta CA-14 hasta el Rancho, El Progreso donde se toma la CA-1 rumbo a la ciudad capital, luego hacia el entronque conocido como Cuatro Caminos para tomar la ruta CA-1 OCC y RD-HUE-12 hasta la cabecera departamental de Huehuetenango para continuar en la ruta RD-HUE-12 hasta el entronque con la Franja Transversal del Norte ubicado en la finca Trinidad, hasta llegar a la aldea Ixquisis, El Pojom. (Figura 2).

Como segunda opción se puede llegar a la cabecera departamental de Huehuetenango y de esta ciudad tomar la carretera Ruta Nacional 9N, pasando por Chiantla, Soloma, Santa Eulalia hasta llegar a San Mateo Ixtatán, a 123 km. De la cabecera municipal de San Mateo Ixtatán se continúan 36 km por camino de terracería hasta la aldea El Pojom, lugar en donde se ubica el proyecto.

FIGURA 2
VÍAS DE ACCESO AL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia con base en el sistema de rutas nacionales.

1.8 Clima y vegetación

Según el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), el clima del municipio de Huehuetenango está clasificado como de meseta y altiplanos que, por medio de las montañas definen la variabilidad, con elevaciones mayores o iguales a 1 400

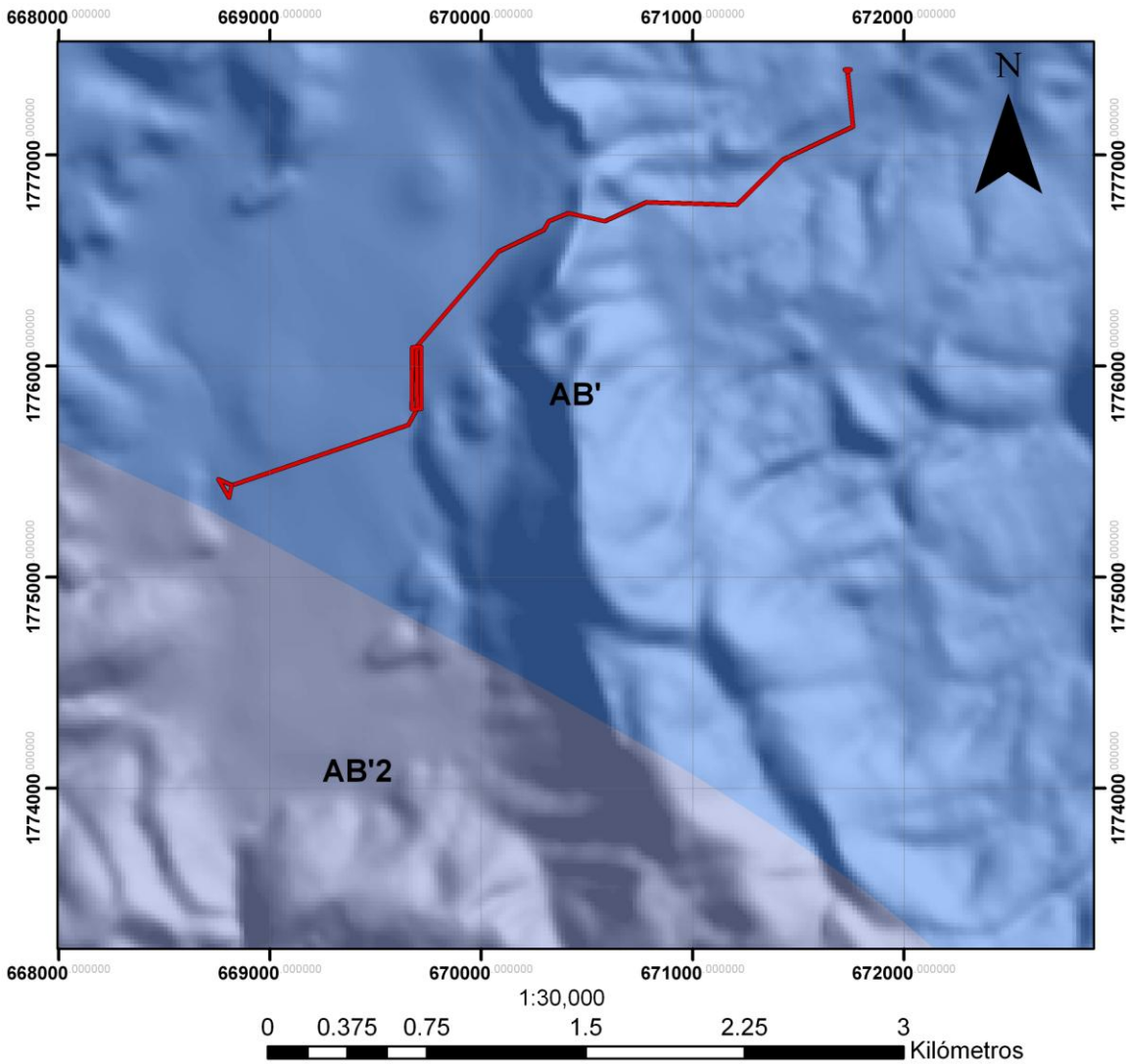
msnm, lo cual genera diversidad de microclimas; son regiones de población densa por lo que la acción humana se convierte en factor de variación aceptable.

Las lluvias no son tan intensas, los registros más altos se obtienen de mayo a octubre, en los meses restantes éstas pueden ser deficitarias; en cuanto a la temperatura en diversos puntos de esta región se registran los valores más bajos del país. En esta región existen climas que varían de templados y semifríos con invierno benigno a semicálido, e invierno benigno de carácter húmedo y semiseco con invierno seco.

“Según el sistema de clasificación climática propuesto por Thornthwaite, en el área del proyecto predomina un único tipo de clima, que se designa con la nomenclatura AB'. Su jerarquía de temperatura, es templada. La jerarquía de humedad, es muy húmeda (A). El tipo de distribución de la lluvia, es sin estación seca bien definida (c). La vegetación característica de este clima, es de selva”.⁵ (Mapa 1)

⁵ Ecoservicios Integrados. *Construcción y operación de la hidroeléctrica Pojóm 1. Estudio de evaluación del impacto ambiental*. Guatemala: ECOSISA, 2 010. 56.

MAPA 1 MAPA DE CLIMAS SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE THORNWAITE



LEYENDA

- ÁREA DEL PROYECTO
- TRAZO DE OBRAS
- AB' Muy Húmedo-Semicálido
- AB'2 Muy Húmedo-Templado

PROYECTED COORDINATES SYSTEM WGS 84
UTM ZONE 15
PROJECTION TRANSVERSE MERCATOR
LINEAR UNIT: METER

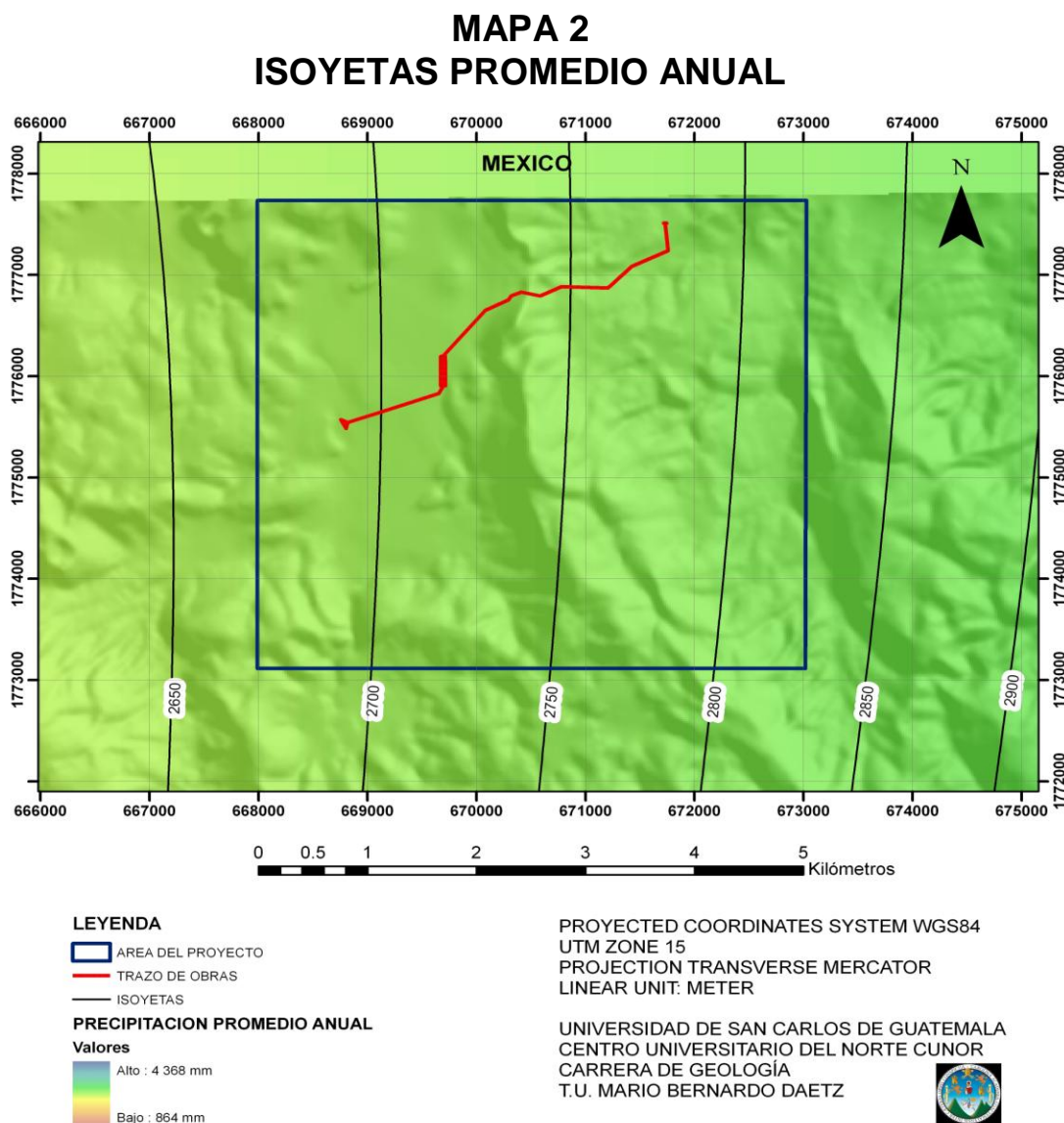
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE CUNOR
CARRERA DE GEOLOGÍA
T.U. MARIO BERNARDO DAETZ



Fuente: Elaboración propia en base a datos disponibles en: SEGEPLAN-SINIT
<http://www.segeplan.gob.gt> (mayo 23 del 2 014).

1.9 Precipitación

“La precipitación pluvial promedio anual es de 2000 mm, distribuidos en 175 días lluviosos al año. La temporada seca comienza en noviembre y termina en mayo, siendo marzo el mes más seco. La temporada lluviosa comienza en junio y culmina en octubre, siendo agosto el mes más lluvioso”.⁶ (Mapa 2)



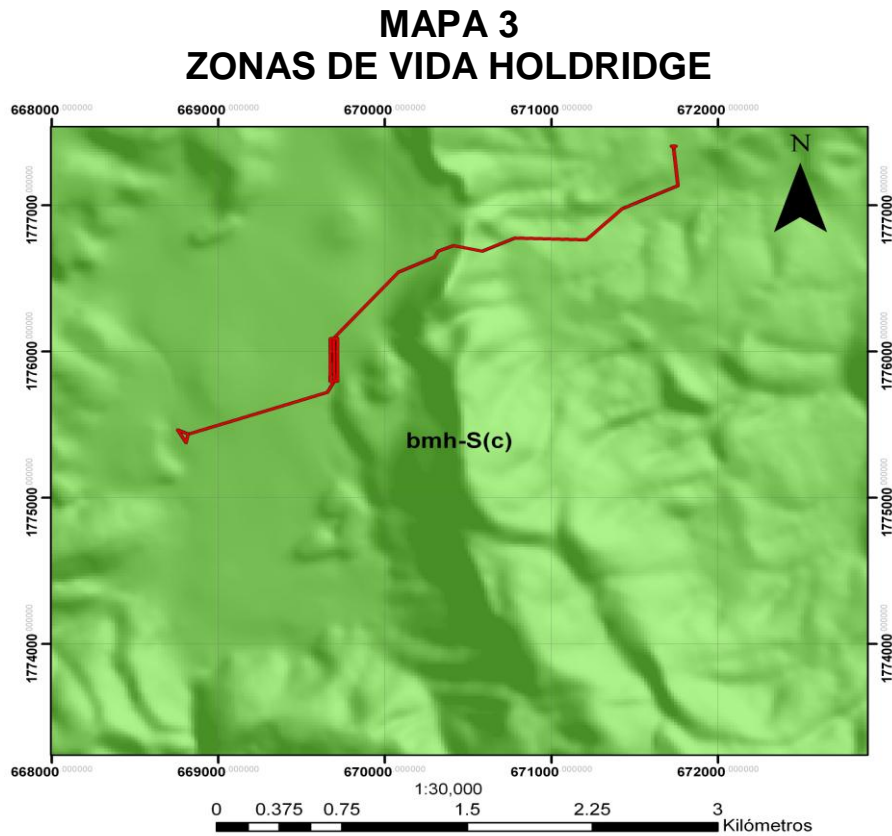
Fuente: Elaboración propia en base a datos meteorológicos históricos del INSIVUMEH

⁶ Ibid., 80.

1.10 Zonas de vida

En el territorio del municipio de San Mateo Ixtatan, predominan tres unidades bioclimáticas identificadas, de las cuales el proyecto se encuentra en: Bosque Muy Húmedo Subtropical Cálido bmh-S (c). El Bosque Muy Húmedo Subtropical Cálido bmh-S (c) del área (Mapa 3).

Se caracteriza por ser una zona de vida que tiene una altitud de 1 000 msnm a 1 500 msnm. La precipitación pluvial anual de 1 000 mm a 2 000 mm. En ciertas microzonas alcanza 4 000 mm. La temperatura media: 18 °C a 24 °C.



LEYENDA

- ÁREA DEL PROYECTO
- TRAZO DE OBRAS

ZONAS

- bmh-S(c) Bosque muy húmedo subtropical cálido

PROYECTED COORDINATES SYSTEM WGS 84
UTM ZONE 15
PROJECTION TRANSVERSE MERCATOR
LINEAR UNIT: METER

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE CUNOR
CARRERA DE GEOLOGIA
T.U. MARIO BERNARDO DAETZ



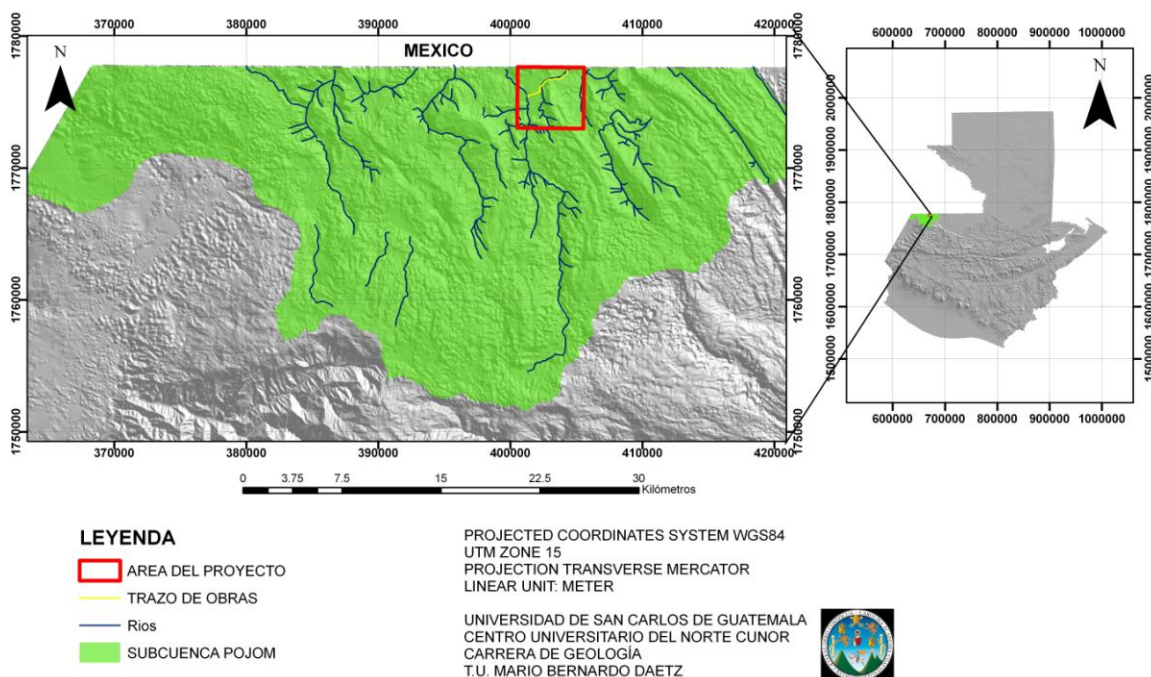
Fuente: Elaboración propia en base a datos disponibles en: SEGEPLAN-SINIT <http://www.segeplan.gob.gt> (mayo 23 del 2 014).

1.11 Drenaje

“El proyecto hidroeléctrico se encuentra ubicado en la subcuenca del río Pojom en la cuenca del río Usumacinta de la vertiente del Golfo de México. Aunque en Guatemala se maneja como una cuenca independiente, esta es una pequeña cuenca de la enorme cuenca Grijalva-Usumacinta del vecino país, México”.⁷ (Mapa 4)

En el contexto geomorfológico, el tipo de drenaje localizado en el área del proyecto pertenece a un sistema de drenaje dendrítico, con brazos o ramales que alimentan a un afluente principal localizado en el país vecino de México.

**MAPA 4
DELIMITACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO POJOM**



Fuente: Elaboración propia en base a datos disponibles en: SEGEPLAN-SINIT <http://www.segeplan.gov.gt> (mayo 23 del 2 014).

⁷ Ibid., 61.

1.12 Fisiografía

Según la clasificación de provincias fisiográficas de Guatemala, el área del proyecto se encuentra dentro de lo que se denomina Tierras Altas Sedimentarias, conocida más específicamente como zona montañosa cárstica de Huehuetenango-Chiapas. (Mapa 5)

Esta región de Tierras Altas Sedimentarias, comprende las áreas de rocas sedimentarias de gran espesor, con edades que van desde el período Pérmico hasta el Terciario. Incluyen rocas caliza, lutitas, grawacas, capas rojas y evaporitas.



Fuente: Elaboración propia en base a datos disponibles en: SEGEPLAN-SINIT <http://www.segeplan.gob.gt> (mayo 23 del 2 014).

1.13 Suelos

“En 1959, C.S. Simmons *et al* elaboró un mapa de suelos a escala 1:250 000, de la república, cuya clasificación era referida específicamente a la fertilidad de los suelos, peligro de erosión, capacidad de producir cosechas y su uso potencial”.⁸

De acuerdo a esta clasificación, en el área estudiada se presentan la siguiente unidad de suelo.

Serie Quixtan

Suelos originados por caliza, ubicados entre 900 msnm y 2 100 msnm con relieve kárstico, tienen un drenaje interno bueno, son de color café muy oscuro a negro. Su textura es franco arcillo turbosa, su textura superficial es media, con un pH neutro y tiene un alto riesgo de erosión. (Mapa 6)

Desde el punto de vista taxonómico, la serie Quixtan son suelos *Udepts-Rendolls*, los cuales se describen a continuación: *Udepts* (Pd): Inceptisoles (Suelos incipientes o jóvenes, sin evidencia de fuerte desarrollo de sus horizontes, pero son más desarrollados que los entisoles. Son suelos muy abundantes en diferentes condiciones de clima y materiales originarios) que no están secos en su interior por más de 90 días.

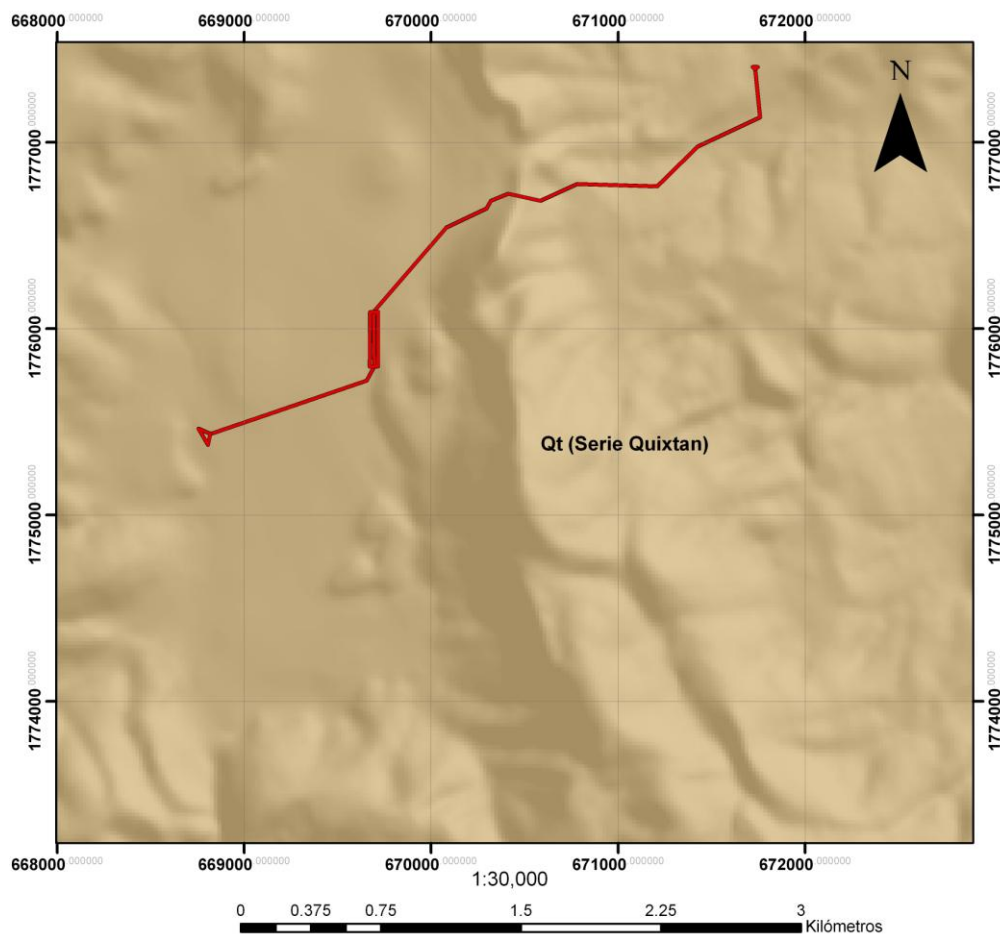
Tienen un adecuado contenido de humedad la mayor parte del año. Generalmente presentan buenas condiciones para actividades productivas, pero cuando se encuentran en regiones de alta pluviosidad, demandan reposición de nutrientes para hacerlos productivos.

⁸ Universidad Rafael Landívar –URL-. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. *Perfil Ambiental de Guatemala 2003: Estado del uso actual de la tierra en Guatemala*. Guatemala: IARNA, 2 003. 56.




Rendolls (Mr): Mollisoles (Suelos con un horizonte superficial grueso, oscuro, generalmente con alto contenido de materia orgánica y una alta saturación de bases (mayor del 50%). Son suelos bastante fértiles, y por sus características físicas y químicas, generalmente son muy buenos suelos para la producción agrícola.

Es común encontrarlos en relieves planos o casi planos, lo que favorece su mecanización. Sin embargo, se debe de planificar su aprovechamiento, para que este sea sostenible). Con un horizonte superior entre 10 cm y 50 cm de profundidad, alto contenido de materia orgánica, desarrollados sobre caliza suave. Estos suelos, a pesar que cuentan con un buen horizonte superficial, reposan directamente sobre roca caliza, lo que limita su profundidad.

MAPA 6 MAPA DE SUELOS CON LA EXTENSIÓN DE LA SERIE QUIXTAN



LEYENDA

-  ÁREA DEL PROYECTO
-  TRAZO DE OBRAS
-  SUELOS (Serie Quixtan)

PROYECTED COORDINATES SYSTEM WGS 84
UTM ZONE 15
PROJECTION TRANSVERSE MERCATOR
LINEAR UNIT: METER

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE CUNOR
CARRERA DE GEOLOGÍA
T.U. MARIO BERNARDO DAETZ



Fuente: Elaboración propia en base a datos disponibles en: SEGEPLAN-SINIT
<http://www.segeplan.gob.gt> (mayo 23 del 2 014).

1.14 Estabilidad y vulnerabilidad de laderas

La información obtenida del análisis de las fotografías aéreas y del reconocimiento de campo permiten concluir que no hay áreas vulnerables a las amenazas geodinámicas.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Generalidades

A continuación, se presentan y explican las etapas de recopilación bibliográfica, donde se revisó documentos de estudios varios referentes a la caracterización de macizos rocosos y la descripción de la metodología a utilizar en el estudio.

En la fase de campo, con la recolección de datos estructurales se obtienen parámetros para la clasificación geomecánica y la fase de gabinete con resultados como el *RMR* y *SRM*.

2.2 Marco metodológico

2.2.1 Etapa de recopilación y análisis bibliográfico

Se llevó a cabo la recolección de información con relación a la investigación, que nos permitiera realizar la clasificación *RMR* de Bieniawski, aspectos geotécnicos a utilizar y sus respectivas aplicaciones en taludes.

Además, se recolectó información con respecto a clima, zonas de vida, cuencas hidrográficas, tipos de suelos y fisiografía, con la finalidad de obtener más información sobre el área de estudio, se recopiló información existente con respecto a la geología regional y estructuras que afectan al área.

2.2.2 Etapa de campo

En esta etapa se realizaron visitas al campo para la recolección de datos, tanto litológicos como estructurales y aspectos que son necesarios para realizar una clasificación de macizos rocosos con la metodología de Bieniawski.

Entre los aspectos recolectados se tiene:

Resistencia de la roca intacta, *RQD* (Designación de la calidad de la roca), espacio de las discontinuidades, condición de las discontinuidades y condiciones hidrológicas

Cada dato se recolectó con la finalidad de obtener valores para la clasificación geomecánica de los macizos rocosos existentes en el proyecto a evaluar.

2.2.3 Etapa de gabinete

Se realizó la ponderación de los datos recolectados en la etapa de campo, para obtener una clasificación *RMR* de los macizos rocosos encontrados en el área. También se utilizó la clasificación geomecánica de romana *SMR* (*Slope Mass Rating*) para la clasificación de taludes a partir del *RMR*.

Se utilizaron diagramas estereográficos para determinar los mecanismos de rotura y análisis de las familias de discontinuidades

Como producto final se elaboró el mapa geológico estructural a escala 1:20 000 del área de estudio como parte complementaria.(Ver Anexo IX)

2.3 Metodología

2.3.1 Caracterización geomecánica

Se describen los aspectos generales de la clasificación de Bieniawski para la clasificación geomecánica de macizos rocosos, además de explicar cada uno de los cuadros para los parámetros y valores utilizados por esta clasificación; el valor numérico indicado representa un rango de calidad de la roca.

a. Clasificación de Bieniawski o sistema *RMR (Rock Mass Rating)*

La clasificación geomecánica *RMR*, también conocida como clasificación geomecánica de Bieniawski, fue presentada por el ingeniero Bieniawski en 1973 y modificada sucesivamente en 1976, 1979, 1984 y 1989.

“Permite hacer una clasificación de las rocas *in situ*. Se utiliza usualmente en la construcción de túneles, taludes y cimentaciones. Consta de un índice de calidad *RMR (Rock Mass Rating)* independiente de la estructura y de un factor de corrección, tomado en cuenta los siguientes parámetros”.⁹

1) Resistencia de la Matriz Rocosa (MPa)

La resistencia de la matriz rocosa puede ser estimada *in situ* con la utilización del martillo de geólogo o bien el martillo de *Schmidt*, este procedimiento consta de golpear la roca “n” veces y comprobar con el cuadro 1 propuesto por el *ISRM* (Método sugerido para la cuantificación y descripción de discontinuidades en

⁹ Richard ZT. Bienawski. *Enginnering Rock Mass Classifcations: A Complete Manual For Engineers and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York, United States of America: Wiley-Interciense, 1989. 87.

macizos rocosos) para luego otorgar una ponderación en el cuadro 8 de clasificación de macizos rocosos de Bieniawski (1 989).

CUADRO 1 RESISTENCIAS A PARTIR DE ÍNDICES DE CAMPO

RESISTENCIAS A PARTIR DE ÍNDICES DE CAMPO (ISRM)			
Clase	Descripción	Identificación de Campo	Resistencia a la compresión (MPa)
S1	Suelo muy blando	El puño penetra fácilmente varios centímetros	< 0,0025
S2	Suelo blando	El dedo penetra fácilmente varios centímetros	0,0025 - 0,05
S3	Suelo firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo	0,05 - 0,1
S4	Suelo rígido	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo	0,1 - 0,25
S5	Suelo muy rígido	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0,25 - 0,5
S6	Suelo duro	Se marca con dificultad al presionar con la uña	> 0,5
Ro	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0,25 - 1,0
R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1,0 - 5,0
R2	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0 - 25
R3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25 - 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla	50 - 100
R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100 - 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo solo saltan esquirlas	> 250

Fuente: Modificado de *ISRM Suggested Methods. Quantitative description of discontinuities in rock masses*. 1 974.

2) RQD (Designación de la calidad de la roca)

La designación de calidad de la roca fue propuesta por Deer¹⁰ y lo define 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.

Para la determinación del RQD cuando no existe un programa de barrenación y testificación se utiliza la fórmula establecida por Palmström (1 982) el cual sugirió:

¹⁰ Don U. Deere, "Technical Description of Rocks Cores for Engineering Purpose". *XIIIth Colloquium of the International Society of Rock Mechanics*. Vol. 1, Issue 1. 1 962. 18.

Cuando el nucleado de las rocas no esté disponible, pero las trazas de las discontinuidades sean visibles y expuestas en superficie o en trincheras de exploración, el *RQD* puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen (m^3).

La relación sugerida para masas rocosas libres de arcilla es:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

Teniendo en cuenta lo siguiente:

$$RQD = 0 \text{ para } J_v > 35$$

$$RQD = 100 \text{ para } J_v < 4,5$$

Además J_v es la sumatoria del número de juntas por unidad de longitud para todos los conjuntos de juntas (discontinuidad).¹¹

3) Separación entre diaclasas

El espaciamiento entre discontinuidades es la distancia entre ellas, medidas a lo largo de una línea perpendicular a los planos de la discontinuidad. El *ISRM* sugirió el uso de un mínimo, la media y valores máximos de espaciado para caracterizar un conjunto de diaclasas. Este procedimiento ha sido reemplazado en la práctica por el uso de una media de la separación. Bieniawski define el espacio como la distancia media, por lo que los valores promediados de la separación entre diaclasas son

¹¹ A. Palmström. "The volumetric joint count- a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing." 4th IAEG Congress. New Delhi, India: 1 982. 221-228

los valores adecuados para utilizar en las clasificaciones RMR y SMR. (Cuadro 2)

CUADRO 2 CLASIFICACIÓN PARA SEPARACIÓN DE DIACLASAS (ISRM, BIENIAWSKI)

Clasificación para separación de diaclasas (ISRM, Bieniawsky)			
Tipo	Descripción	Espaciado (m)	Condición del macizo rocoso
I	Muy amplia	> 2	Sólido
II	Amplia	0,6 - 2	Masivo
III	Moderada	0,2 - 0,6	Bloque/Cicatrices
IV	Cerca	0,06 - 0,2	Bloques pequeños/Fracturado
V	Muy cerca	> 0,06	Brechificado

Fuente: ISRM Suggested Methods. *Quantitative description of discontinuities in rock masses.* 1974.

4) Naturaleza de las discontinuidades

Este es un parámetro muy complejo que incluye varios subparámetros entre los cuales están:

- (i) **Longitud de la discontinuidad:** La longitud o continuidad de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento.
(Cuadro 3)

CUADRO 3 LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD

Longitud de la discontinuidad (ISRM)		
Tipo	Continuidad	Longitud (m)
I	Muy baja	< 1
II	Baja	1 a 3
III	Media	3 a 10
IV	Alta	10 a 20
V	Muy alta	> 20

Fuente: ISRM Suggested Methods. *Quantitative description of discontinuities in rock masses.* 1974.

(ii) **Abertura:** La abertura es la distancia perpendicular entre la pared de roca de una junta abierta o en otras palabras: la abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad. Si la junta se encuentra rellena el término apropiado es ancho. (Cuadro 4)

CUADRO 4 ABERTURA DE LAS DISCONTINUIDADES

Abertura de las discontinuidades (ISRM)			
Tipo	Descripción	Espaciado (mm)	Condición del macizo
I	Cerrada	< 0,1	Difícil observar a simple vista
II	Moderadamente abierta	< 1	Paredes en contacto con un pequeño movimiento de cizalla
III	Abierta	1 a 5	Paredes en contacto después de un movimiento de cizalla
IV	Muy abierta	> 5	Las paredes pueden permanecer separadas a pesar de un movimiento de rotura

Fuente: ISRM Suggested Methods. *Quantitative description of discontinuities in rock masses*. 1974.

(iii) **Rugosidad:** Bieniawski propuso una escala de rugosidad la cual es muy fácil de verificar en el campo. (Cuadro 5)

La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y por lo general con el espesor de relleno.

CUADRO 5 RUGOSIDAD EN DISCONTINUIDADES

Rugosidad (<i>ISRM</i> , Bieniawski)	
Tipo	Descripción
I	Muy rugosa
II	Rugosa
III	Ligeramente rugosa
IV	Ondulada
V	Suave

Fuente: *ISRM Suggested Methods. Quantitative description of discontinuities in rock masses.* 1 974.

(iv) Relleno: Para propósitos prácticos es necesario distinguir entre relleno consolidado y relleno suave. Relleno consolidado es el que contiene un material de alta fricción (calcita, areniscas, polvo de rocas trituradas, etc) y relleno suave es el que está compuesto con un material de baja fricción (arcillas, micas, minerales arcillosos, etc)

5) Meteorización

La meteorización actúa la mayoría de las veces en forma combinada con un debilitamiento estructural previo del macizo, el cual puede haberse producido por el fallamiento, la fractura o el diaclasado. La actuación de los agentes físicos y composición mineralógica a través de los cuales se desarrolla la meteorización, puede resultar decisiva en cuanto a la resistencia mecánica, o mejor aún a las propiedades geotécnicas de un macizo rocoso. (Cuadro 6)

CUADRO 6 CLASIFICACIÓN DEL GRADO DE METEORIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS (ISRM)

Clasificación del grado de meteorización de macizos rocosos (ISRM)		
Tipo	Término	Descripción
I	Inalterado	No aparecen signos visibles de meteorización, tal vez ligera decoloración en las grandes superficies de discontinuidad.
II	Ligeramente meteorizado	Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización. La decoloración indica meteorización del material rocoso y de las superficies de discontinuidad.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece de forma continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece de forma discontinua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo aparece descompuesto o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.

Fuente: ISRM Suggested Methods. *Quantitative description of discontinuities in rock masses*. 1974.

6) Agua freática

Las condiciones del agua freática pueden ser estimadas en el *RMR* en tres diferentes maneras: la primera como influjo de agua en túneles, la segunda como la presión de poro y la última es la de condiciones generales. El *ISRM* propone una clasificación para las condiciones generales las cuales son mostradas en el cuadro 7.

CUADRO 7 DESCRIPCIÓN DE LAS FILTRACIONES

Descripción de las filtraciones (ISRM)		
Tipo	Juntas sin relleno	Juntas con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. La junta aparece seca y no parece posible que circule agua	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua	Relleno húmedo pero sin agua libre
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado ocasionalmente agua	Relleno mojado con goteo ocasional
IV	Junta húmeda pero sin agua libre	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (l/min)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo, pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (l/min y presión)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión)	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevada

Fuente: ISRM Suggested Methods. *Quantitative description of discontinuities in rock masses*. 1974.

7) Obtención del RMR básico

Con los seis parámetros que necesita la clasificación geomecánica de Bieniawski se lleva a cabo la ponderación de los mismos dándoles un valor numérico y posteriormente sumándolo para la obtención del *RMR* básico como se muestra en el cuadro 8.

CUADRO 8 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR BÁSICO

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989)									
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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			
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo		flujo continuo (l/min) y presión
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión		lavado, presiones elevadas
		Puntuación	15	15	10	7	4		0
TOTAL PUNTAJE			66						

Fuente: Modificado de *ISRM Suggested Methods. Quantitative description of discontinuities in rock masses.* 1 974.

8) Corrección por la orientación de las discontinuidades

Se realiza después de obtener el *RMR* básico este es un factor de ajuste el cual se basa en la relación entre la geometría y buzamiento de taludes y de las discontinuidades que les afecta. La corrección por la orientación de las discontinuidades tiene una valoración negativa que oscila entre 0 y -60 para taludes. El cuadro 9 muestra las relaciones entre la geometría y buzamiento dando la valoración negativa la cual deberá ser sustraída

del *RMR* básico, para cada uno de los casos que se puedan observar en los taludes.¹²

CUADRO 9 CORRECCIÓN DE *RMR* PARA TALUDES

GEOMETRÍA	BUZAMIENTO	DESIGNACIÓN	PTS
Dirección de discontinuidad paralelo a la dirección del talud ($\pm 20^\circ$ de la dirección del talud)	Buzamiento de la discontinuidad menor a la del talud	Muy desfavorable	-60
	Buzamiento de la discontinuidad igual a la del talud	Desfavorable	-50
	Buzamiento de la discontinuidad mayor a la del talud	Favorable	-5
	Buzamiento de la discontinuidad casi horizontal	Muy favorable	0
Dirección de la discontinuidad contraria a la del talud (contrabuzamiento) ($\pm 20^\circ$ de la dirección del talud)	Buzamiento de la discontinuidad mayor o igual a la del talud	Regular	-25
	Buzamiento de la discontinuidad menor a la del talud	Muy favorable	0
Dirección de la discontinuidad perpendicular a la del talud, ($\pm 20^\circ$ de la dirección del talud)	Buzamiento de 0° a 90°	Favorable	-5
Dirección de la discontinuidad a 45° de la dirección del talud y a favor de este ($\pm 10^\circ$ de la dirección del talud)	Buzamiento de 0° a 90°	Regular	-25
Dirección de la discontinuidad a 45° de la dirección del talud y contrario a este ($\pm 10^\circ$ de la dirección del talud)	Buzamiento de 0° a 90°	Favorable	-5
Dirección cualquiera (no perpendicular, no paralelo)	Buzamiento de 0° a 90°	Situación neutra	****

Fuente: *Estudio Geotécnico de Macizos Rocosos ubicados sobre la carretera AV-29, San Antonio Senahú, Alta Verapaz. 2 014.*

Establecida la relación entre la geometría y buzamiento se obtiene una valoración negativa la cual deberá de ser sustraída al *RMR* básico para obtener el

¹²Cristian Desiderio, Caal Caal. *Estudio Geotécnico de Macizos Rocosos ubicados sobre la carretera AV-29, San Antonio Senahú, Alta Verapaz.* Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2 014. 33.

RMR real y dar la verdadera clasificación del macizo rocoso. (Cuadro 10)

CUADRO 10 CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60
TOTAL PUNTAJE		66				
TALUDES		-5				
TOTAL		61				

Fuente: Modificado de *ISRM Suggested Methods. Quantitative description of discontinuities in rock masses*. 1 974.

Posterior a la obtención del *RMR* real ya puede ser clasificado el macizo rocoso en cualquiera de las cinco clases que se tienen. La clasificación se realiza al observar el resultado e identificar a cuál de los cinco intervalos pertenece, como se muestra en el cuadro 11.

CUADRO 11 CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD *RMR*

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD <i>RMR</i>					
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: Modificado de *ISRM Suggested Methods. Quantitative description of discontinuities in rock masses*. 1 974.

Posteriormente con los parámetros y correcciones, se clasifica el macizo rocoso según la guía del cuadro de clasificación índice de calidad *RMR* y sus consideraciones geotécnicas. (Cuadro 12)

CUADRO 12 CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD *RMR* Y SUS CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD <i>RMR</i>					
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS					
CLASE	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2.5 m de vano	30 minutos con 1m de vano
Cohesión	> 4 kg/cm ²	3 - 4 kg/cm ²	2 - 3 kg/cm ²	1 - 2 kg/cm ²	<1 kg/cm ²
Angulo de rozamiento	> 45°	45 - 35°	35 - 25°	25 - 15°	< 15°

Fuente: Modificado de ISRM Suggested Methods. *Quantitative description of discontinuities in rock masses*. 1 974.

b. Clasificación geomecánica de Romana o sistema *SMR* (*Slope Mass Rating*) para taludes

El *SRM* se trabaja en base en factores de corrección los cuales están en función de la orientación del talud, de las discontinuidades y del método de excavación a utilizar en el talud.

“El *SRM* se caracteriza por su carácter discreto, asignando a cada parámetro una determinada puntuación en función del valor que adopta la variable que controla dicho parámetro. Como consecuencia se observa que pequeños cambios en el valor de dicha variable da lugar a notables variaciones del parámetro en cuestión, lo que ocasiona cambios en la calidad del macizo rocoso. Además no hemos de obviar el hecho de que el cálculo de los índices de calidad geomecánica discretos contiene una importante componente de juicio personal que también condiciona el índice de calidad final”.¹³

El índice *SMR* para la clasificación de taludes se obtiene del *RMR* básico sumando un "factor de ajuste", que

¹³ R. Tomas, Et. Al. *Propuesta metodológica para la aplicación del Slope Mass Rating Continuo (SMR-C) mediante un sistema de información geográfica*. VII Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables. Barcelona, España: CINME, 2 009. 2.

es función de la orientación de las juntas (producto de tres subfactores) y un "factor de excavación" que depende del método utilizado.¹⁴ La fórmula que define el sistema es la siguiente:

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

El *RMR* se calcula según el propuesto por Bieniawski, añadiendo valores de clasificación de cinco parámetros: (i) resistencia de la matriz rocosa, (ii) *RQD* (medido o estimado), (iii) separación de las discontinuidades, (iv) condición de las discontinuidades y (v) influjo de agua a través de las discontinuidades (estimado en las peores condiciones posibles). El *RMR* tiene un rango de valores de 0-100.

El factor de ajuste para las discontinuidades es el producto de tres factores los cuales se describen a continuación:

F1 depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas 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:

$$F1 = (1 - \text{sen } A)^2$$

Siendo $A = aj - as$, donde (aj) dirección del buzamiento de la junta y dirección del buzamiento de talud (as).

¹⁴ John, Hudson A. *Comprehensive Rock Engineering: principles, practices and projects. A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating*. M. R. Romana. Great Britain: Pergamon Press Ltd, 1 993. 10.

F2 depende del buzamiento de la junta en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta. Varía entre 1,00 (para juntas con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para juntas con buzamiento inferior a 20°). Fue establecido empíricamente, pero puede ajustarse aproximadamente según la relación:

$$F2 = (\text{tg}^2 b_j)$$

Donde (b_j) es el buzamiento de la junta. F2 vale 1,00 para las roturas por vuelco.

F3 refleja la relación entre los buzamientos de la junta y el talud.

Se han mantenido los valores propuestos por Bieniawski en 1976 que son siempre negativos.¹⁵ (Cuadro 13)

¹⁵ Ibid., 11.

CUADRO 13
FACTORES DE AJUSTE PARA LA ORIENTACIÓN DE LAS JUNTAS

Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$ aj - as $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
W	$ ai - as $					
T	$ aj - as - 180^\circ $					
P/T/W	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	$ bj $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	W					
	F2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F2	1	1	1	1	1
P	$bj - bs$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
W	$bi - bs$					
T	$bj + bs$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	*****	*****
P/T/W	F3	0	-6	-25	-50	-60

P: rotura planar; **W:** rotura en cuña; **T:** rotura por vuelco; **as:** dirección de buzamiento del talud; **bs:** buzamiento del talud; **aj:** dirección de buzamiento de las discontinuidades; **bj:** buzamiento de la junta; **ai:** dirección de la intersección de los planos que conforman la cuña; **bi:** buzamiento de la intersección de los planos que conforman la cuña.

Fuente: Modificado de *Comprehensive Rock Engineering: principles, practices and projects. A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. M. R. Romana. 1993.*

El factor **F4** es el ajuste por los métodos de excavación (cuadro 14) que han sido propuestos empíricamente como lo siguiente:

- (i). Los taludes naturales son más estables, ya a causa de los procesos previos de erosión sufridos por el talud, y de los mecanismos internos de protección que muchos de ellos poseen.
- (ii). Los precortes aumentan la estabilidad de los taludes en media clase.

- (iii). Las voladuras suaves o bien calculadas y ejecutadas también incrementan la estabilidad de los taludes.
- (iv). Las voladuras mecanizadas realizadas con métodos razonables, no realizan cambios en la estabilidad del talud.
- (v). Las voladuras deficientes, a menudo utilizadas con mucho explosivo o bien la explosión fuera de tiempo daña la estabilidad del talud.
- (vi). La excavación mecánica de taludes por ripeado, pueden ser realizadas en rocas fracturadas o blandas, a menudo combinadas con voladuras preliminares que contemplan poco criterio de diseño. Las caras del talud presentan dificultades de acabado. Este método tampoco incrementa o disminuye la estabilidad del talud.

CUADRO 14

FACTOR DE AJUSTE SEGÚN EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN

Método	Talud Natural	Precorte	Voladura suave	Voladura mecánica	Voladura deficiente	Excavación Mecánica
F4	15	10	8	0	-8	0

Fuente: *Comprehensive Rock Engineering: principles, practices and projects. A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. M. R. Romana. 1 993.*

Al considerar todos los aspectos del *SMR* se realiza el producto de los tres factores sumando el resultado al *RMR* y el factor de ajuste según el método de excavación, lo cual nos da un resultado índice del *SMR* para taludes el cual puede ser clasificado en el cuadro 15.

CUADRO 15 CLASES DE ESTABILIDAD SEGÚN EL SMR (ROMANA 1 985)

Clase	SMR	Descripción	Estabilidad	Fallas o roturas	Soporte o tratamiento
I	81 - 100	Muy buena	Totalmente estable	Ninguna	Ninguno
II	61 - 80	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
III	41 - 60	Normal	Parcialmente estable	Algunas juntas o muchas cuñas	Sistemático
IV	21 - 40	Mala	Inestable	Juntas o grandes cuñas	Correctivo
V	0 - 20	Muy mala	Totalmente inestable	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Reexcavación

Fuente: *Comprehensive Rock Engineering: principles, practices and projects. A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. M. R. Romana. 1 993.*

2.3.2 Tipos de mecanismos de falla en taludes

Para la estabilidad de macizos rocosos es importante determinar el modo de falla de los posibles taludes a formar. La orientación del talud respecto a las discontinuidades será uno de los principales aspectos que determinarán el modo de falla del talud. Así mismo, si se acepta que el movimiento posible de bloques de roca solamente es controlado por las discontinuidades, las fallas que pueden ocurrir en un macizo rocoso se pueden dividir en: rotura planar, rotura en cuña, por volteo y rotura en forma circular.

“Sin embargo el desequilibrio de las condiciones de estabilidad, se refiere a movimientos o desplazamientos en las condiciones provocadas por el fracturamiento de la roca y presión dentro del macizo rocoso y no a fallas geológicas específicas”.¹⁶

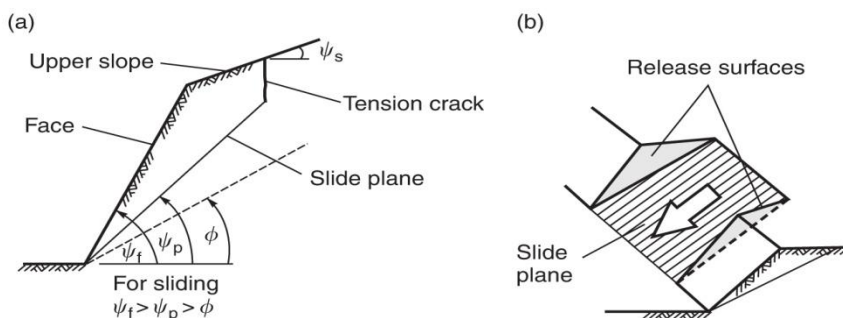
¹⁶ Wyllie C. Duncan, Christopher Mah W. *Rock Slope Engineering, civil and mining. Based on the third edition by E Hoek and J Bray.* New York, United States of America: Spon Press Taylor & Francis Group, 2 004. 77.

a. Rotura planar

Tiene lugar sobre todo en macizos rocosos constituidos por rocas de resistencia media o alta afectadas por fallas y diaclasas. Este tipo de rotura consiste en el deslizamiento de una masa de roca a lo largo de un plano de discontinuidad que ha quedado descalzo por la cara del talud. Aunque no se trata de roturas excesivamente comunes si se pueden observar ocasionalmente en carreteras y en canteras pudiendo dar lugar en algunos casos a roturas rápidas que pueden causar desde pequeños desprendimientos hasta deslizamientos importantes.

Para que se produzca este tipo de rotura debe de ocurrir un conjunto de circunstancias, la primera de ella es que el plano sobre el cual ocurre el movimiento debe de tener un rumbo aproximadamente paralelo ($\pm 20^\circ$) al plano del talud, la segunda, el plano de falla debe de intersectar el plano del talud, es decir, el buzamiento de la discontinuidad (ψ_p) debe ser menor que la pendiente del talud (ψ_f), o sea $\psi_f > \psi_p$, y la tercera el buzamiento del plano de falla debe ser mayor que el ángulo de fricción en ese plano $\psi_p > \phi$. (Figura 3)

FIGURA 3 ROTURA PLANAR EN TALUDES



Geometría de un talud exhibiendo una falla planar a) sección mostrando planos formados a partir de una falla planar; b) superficies de relevamiento en falla planar.

Fuente: *Rock Slope Engineering, civil and mining. Based on the third edition by E Hoek and J Bray. 2 004.*

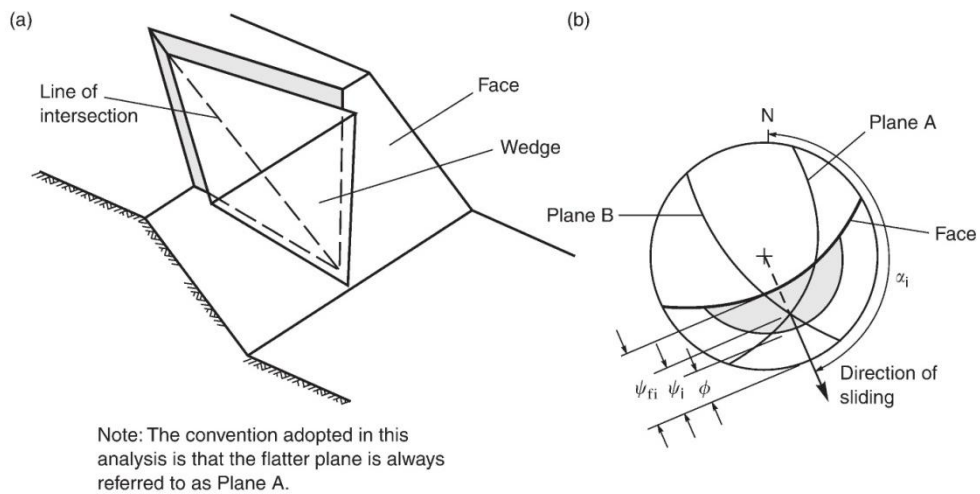
b. Rotura en cuña

Ocurre cuando un bloque de roca se desliza a través de la intersección de al menos dos discontinuidades, las cuales buzan hacia la cara del talud en un ángulo oblicuo hacia la cara del corte, forman así un bloque en forma de cuña. (Figura 4)

“La formación y ocurrencia de la rotura en cuña depende de la litología y la estructura del macizo rocoso. Rocas con juntas ortogonales bien definidas o clivajes en adición a una estratificación o foliación inclinada, generalmente son condiciones favorables para este mecanismo de rotura”.¹⁷

¹⁷ Juan Miguel, Armas Zagoya. *Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamps., México.* Tesis de Maestría en Ciencias Geológicas. México: Universidad Autónoma de Nuevo León - Facultad de Ciencias de la Tierra, 2 004. 37-40

FIGURA 4 ROTURA EN CUÑA



Condiciones geométricas para la rotura en cuña a) rotura en cuña en un talud de roca agrietada; b) estereograma de la geometría de una falla de rotura en cuña en un talud de roca agrietada. NOTA: la convención adoptada en este análisis es que el plano menos inclinado siempre es referido como el plano A.

Fuente: *Rock Slope Engineering, civil and mining. Based on the third edition by E Hoek and J Bray. 2 004.*

Las condiciones para que exista una rotura por cuña son las siguientes:

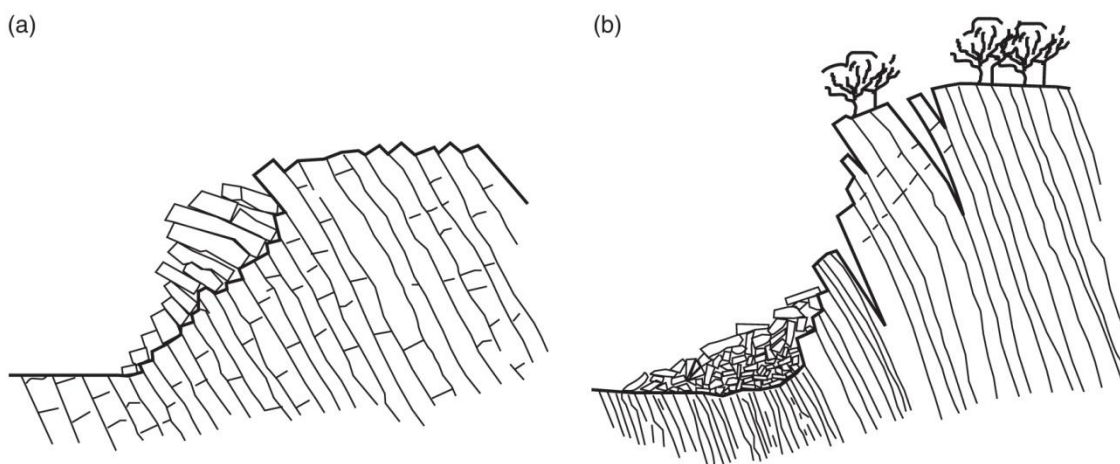
1. La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la superficie del talud.
2. El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud ($\psi_i < \psi_f$).
3. El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos superficies. ($\psi_i > \phi$).

c. Falla por volteo

Las fallas al volteo (*toppling*) ocurren en masas de roca que están subdivididas en una serie de columnas de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud. (Figura 5)

En la falla de volteo la columna de roca rota alrededor de un punto cerca de la base de la misma columna.¹⁸ (Figura 6)

**FIGURA 5
FALLAS DE VOLTEO**



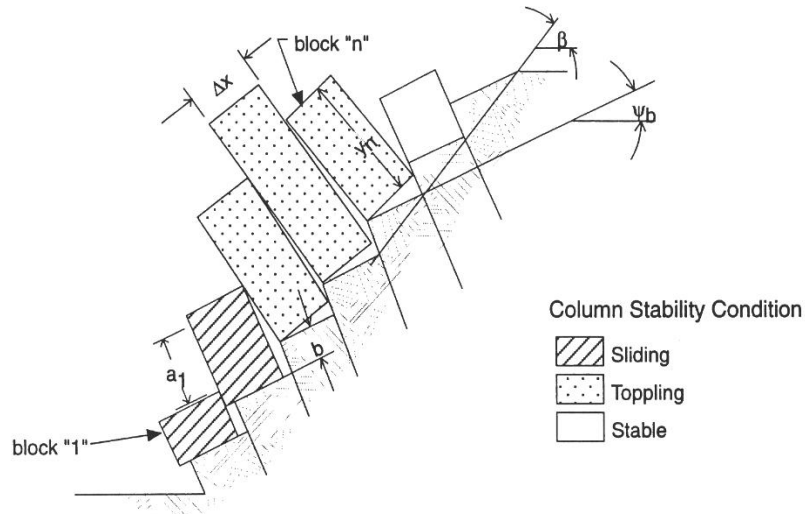
Clases comunes de fallas por volteo a) falla de volteo en roca que por su estructura columnar y contenido de juntas ortogonales altamente inclinadas, b) falla por volteo por flexión o pandeo.

Fuente: *Rock Slope Stability Analysis, Chp. 15, Landslides Investigation and Mitigation.* 1 996.

Este tipo de rotura se produce también en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamientos contrarios a la inclinación del talud, en general los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí.

¹⁸ N. Norrish, & D. Wyllie. *Rock Slope Stability Analysis, Chp. 15, LANDSLIDES INVESTIGATION AND MITIGATION.* Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council. United States of America: National Academy of Sciences. 1996. 410.

FIGURA 6
ESQUEMA GENERAL DE LA FALLA POR VOLTEO



La columna de roca rota alrededor de un punto cerca de la base de la misma columna.

Fuente: *Rock Slope Stability Analysis, Chp. 15, Landslides Investigation and Mitigation.* 1996.

Para que ocurra volteo, necesita que se presenten las siguientes condiciones:

- (i). El rumbo de las capas debe ser aproximadamente paralelo a la superficie del talud. En ningún caso la diferencia debe ser superior a 30° . (Figura 7)
- (ii). El buzamiento debe cumplir la siguiente condición:

$$(90^\circ - \Psi_p) \leq (\Psi_f - \phi_p)$$

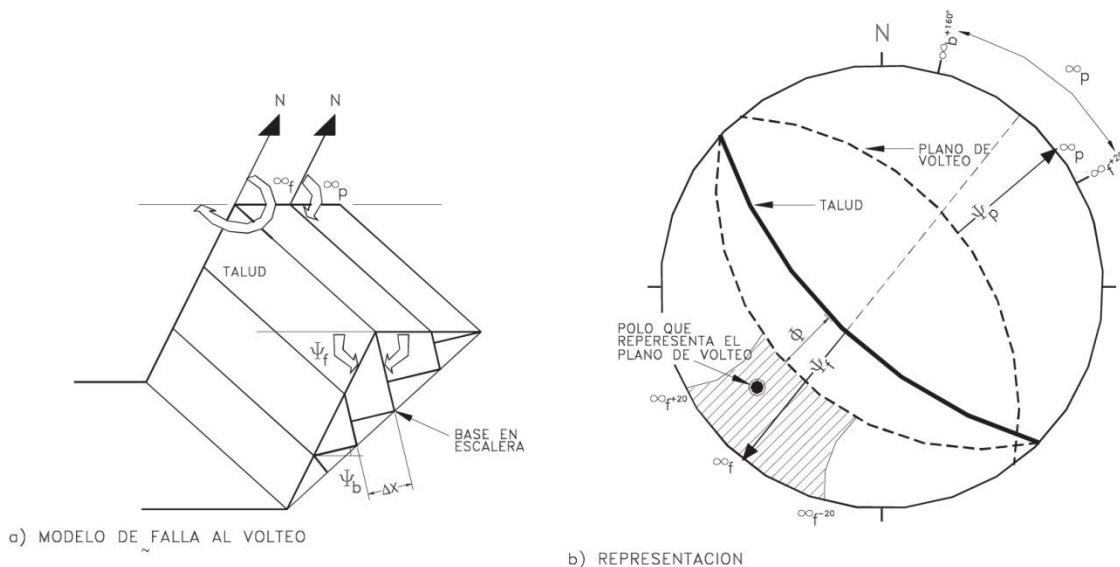
Dónde:

Ψ_p = Buzamiento de las capas

Ψ_f = Buzamiento de la superficie del talud

ϕ_p = Ángulo de fricción a lo largo de los planos.

FIGURA 7 ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA FALLA DE VOLTEO



Fuente: Modificado de *Rock Slope Stability Analysis, Chp. 15, Landslides Investigation and Mitigation*. 1 996.

Goodman y Bray¹⁹ proponen una fácil comprobación cinemática para el vuelco de bloques en donde se incluye el ángulo de fricción interna, la cual está dada por la siguiente relación:

$$\alpha + \beta + (90 - \Phi) \geq 180 \text{ en donde:}$$

α = Inclinación del bloque

β = inclinación del talud

Φ = ángulo de fricción entre los planos

¹⁹ R.E. Goodman, and J.W. Bray. "Toppling of Rock Slopes" Proc. Specialty Conference of Rock Engineering for Foundations and Slopes. Vol.2, Boulder, Colorado: ASCE, 1976. 201-234.

Para Duncan C. Wyllie y Christopher W. Mah²⁰ presentan también su comprobación cinemática en donde los enunciados son los siguientes:

$\Psi_p < \Phi$ será estable y $\Delta x/y < \tan \Psi_p$ ocurrirá el volteo, en donde:

Ψ_p = inclinación del plano

Δx = ancho del bloque

y = altura del bloque

Φ = ángulo de fricción entre los planos

Para la comprobación de la existencia de roturas de vuelco por flexión (*flexural toppling*) se puede utilizar la siguiente condición para determinarlas:

$90 - \alpha + \Phi < \beta$, en donde:

α = inclinación del plano

β = inclinación del talud

Φ = ángulo de fricción entre planos.

d. Rotura circular

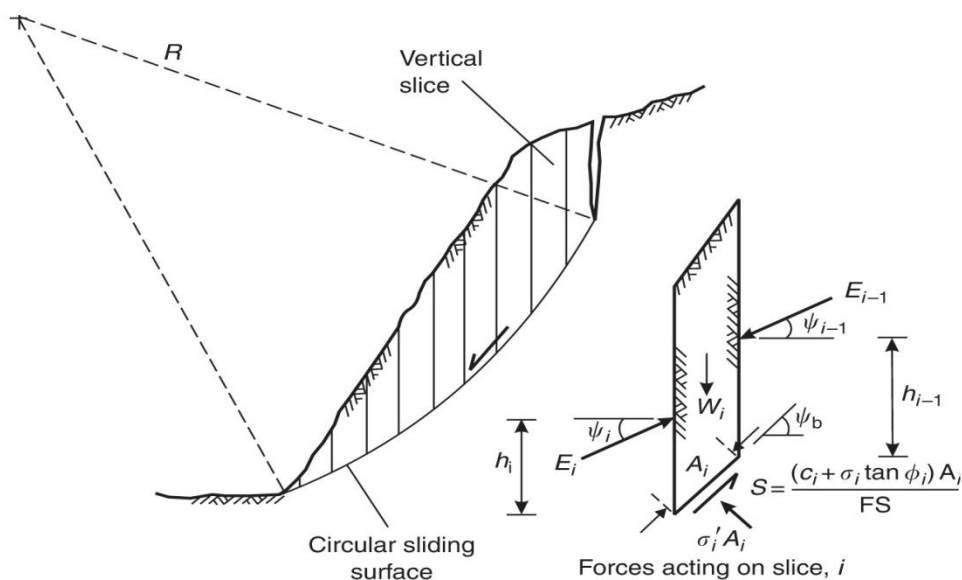
En el caso de suelos, escombros y macizos rocosos de baja calidad o muy alterados, la rotura se produce a través de la masa o el macizo al seguir la línea de menor resistencia. Se produce a lo largo de una superficie de deslizamiento interna, de forma aproximadamente circular y cóncava. Se puede demostrar que en suelos homogéneos la superficie de rotura es una espiral logarítmica y que, por tanto, se aproxima mucho a un círculo.

²⁰ Wyllie C. Duncan, Christopher Mah W. *Rock Slope Engineering, civil and mining, Based on the third edition by E Hoek and J Bray*. New York, United States of America: Spon Press Taylor & Francis Group, 2 004. 204

La mayoría de las teorías de análisis suelen partir de la hipótesis de que la superficie de rotura o deslizamiento es circular por lo que no cometen un error significativo. Los círculos de rotura suelen, además pasar por el pie del talud.

El movimiento tiene una naturaleza más o menos rotacional, alrededor de un eje dispuesto paralelamente al talud.²¹ (Figura 8)

FIGURA 8
FORMA DE UN TÍPICO DESLIZAMIENTO CIRCULAR



Fuente: *Rock Slope Engineering, civil and mining. Based on the third edition by E Hoek and J Bray. 2 004.*

2.3.3 Análisis de estabilidad para mecanismos de rotura en taludes

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, según la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud.

²¹ Ibid., 176

“Para taludes permanentes el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1.5 e incluso 2.0 dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga de los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1.3 pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores”.²²

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad.

a. Análisis de estabilidad de taludes rocosos por proyección estereográfica

La proyección estereográfica es un método de representación y análisis de relaciones tridimensionales entre planos y líneas sobre un diagrama plano. Estos métodos brindan una importante herramienta para la representación y análisis de las propiedades estructurales que controlan el comportamiento de masas de rocas fracturadas o con discontinuidades. Asimismo, son ampliamente utilizados en estudios de mecánica de rocas, ya que ofrecen una apreciación visual inmediata del problema estructural y proveen una solución rápida con precisión más que adecuada para la mayoría de las aplicaciones.

El método de proyección estereográfica no solamente tiene la ventaja de ser un método simple y rápido para analizar la estabilidad de una cuña de roca; además tiene la ventaja de que una variedad de fuerzas requeridas para causar la falla o

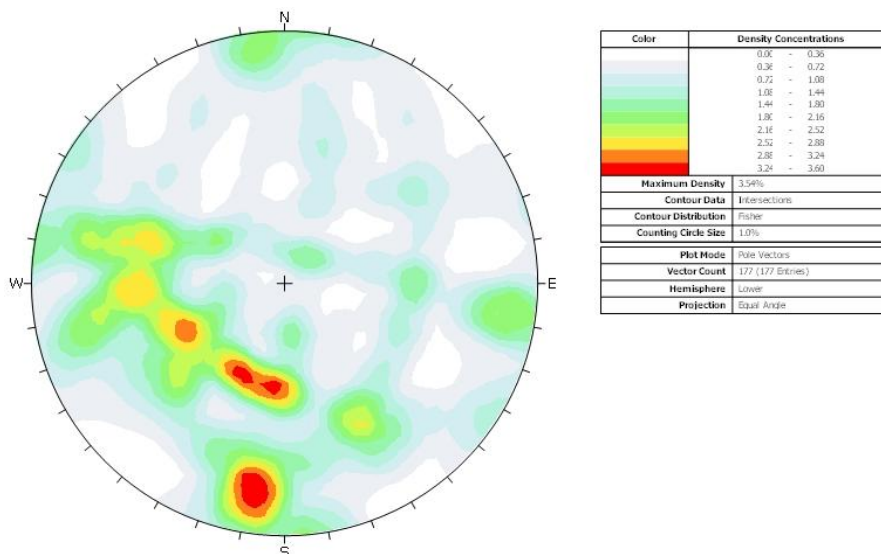
²² Luis I. Gonzáles de Vallejo, Et. Al. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Prentice Hall. 2002. 445.

para asegurar la estabilidad pueden ser claramente visualizadas, sin necesidad de recurrir a cálculos extensos.

b. Análisis estadístico de discontinuidades

Las proyecciones estereográficas pueden emplearse para representar las estructuras de las rocas, delineando el contorno de la intensidad de concentraciones de polos en un estereograma, obtenido mediante un conteo estadístico, de esta manera se puede determinar las familias de discontinuidades predominantes en un macizo rocoso. Para ello se requiere de recolección de datos de orientación de las discontinuidades en el sitio de estudio por medio de levantamientos en la superficie de roca. (Figura 9)

FIGURA 9
ANÁLISIS ESTADÍSTICO, DENSIDAD DE POLOS GENERADO CON STERENET



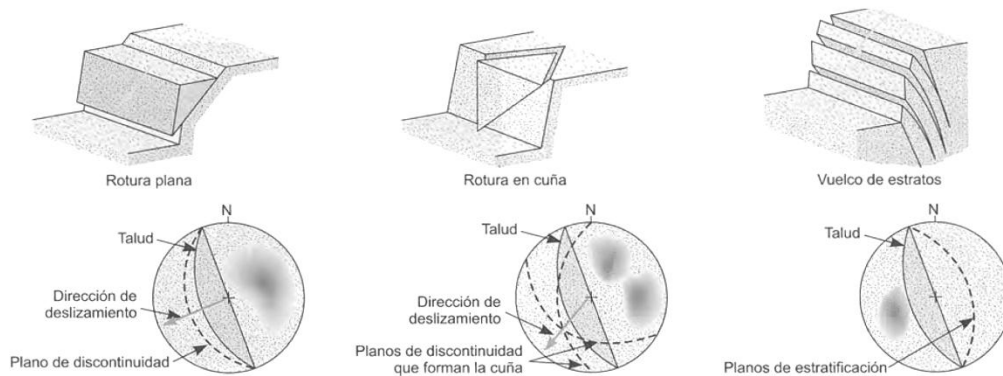
Fuente: Investigación de campo 2 015, utilizando el *software DIPS*.

Además de facilitar la identificación de familias presentes en el macizo, la forma del contorno de concentraciones de discontinuidades permite apreciar de

manera general, el modo de falla que se puede presentar, de acuerdo a las configuraciones de las concentraciones de polos.

En la figura 10 se presentan algunas relaciones entre los principales modos de falla en macizos rocosos y las configuraciones de concentración de los polos que se obtendrían en un contorno de discontinuidades.

FIGURA 10 REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA PARA CADA UNA DE LAS FALLAS POSIBLES EN ROCAS



Fuente: *Ingeniería Geológica*. 2 002.

c. Análisis de la estabilidad con el concepto del círculo de fricción

En los métodos de análisis donde se aplica el concepto de círculo de fricción se asume que la resistencia a la fricción en la superficie es igual en todas direcciones y por tanto, se puede trazar como un cono de fricción alrededor del polo o normal de cada discontinuidad. En el caso de posibilidad de falla en cuña, es necesario dibujar los círculos de fricción en cada polo y de esta manera definir la zona estable o de factores de seguridad mayores a uno.

1) Análisis de estabilidad para mecanismo planar

Una técnica para realizar el análisis de estabilidad de un deslizamiento planar se conoce como el Método de Cono de Fricción. Este método es la combinación de análisis cinemático y cinético, es una forma conveniente de determinar las fuerzas normales al plano y la que actúa bajo la superficie potencial de deslizamiento en una reproducción gráfica vaciada en la red estereográfica de Schmidt. (Figura 11)

Para la determinación del factor de seguridad con el uso de la red estereográfica se calcula de la siguiente manera:

Si no existe cohesión sobre el plano, la fuerza que se opone al deslizamiento del bloque es $R_\varphi = N \operatorname{tg} \varphi$ y el movimiento tendrá lugar cuando $S > R_\varphi$, es decir, cuando $\alpha > \varphi$, el coeficiente de seguridad vendrá dado por:

$$F = R_\varphi / S = (W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi) / (W \operatorname{sen} \alpha)$$

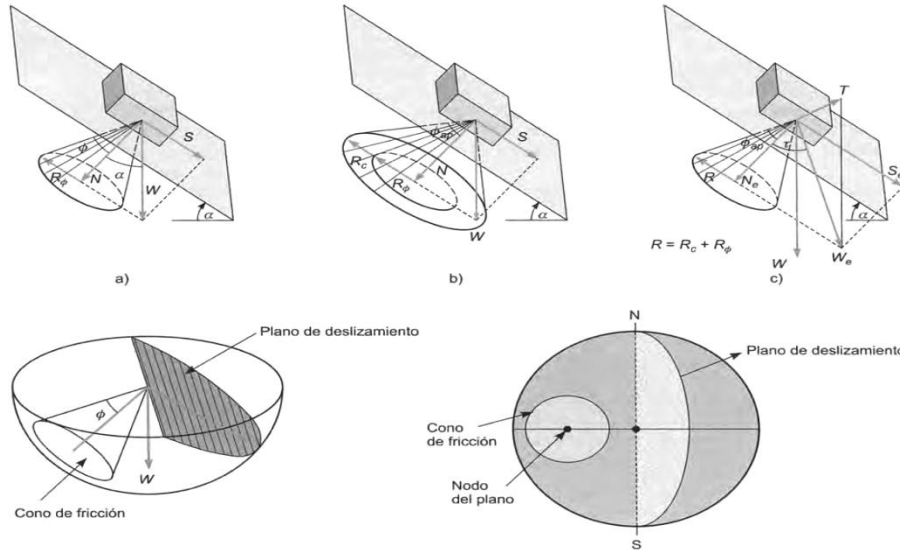
O en una forma reducida se tendría:

$$F = \operatorname{tg} \varphi / \operatorname{tg} \alpha$$

En donde φ es el ángulo de fricción del plano y α el echado del plano.²³

²³ Luis I. Gonzáles de Vallejo, Et. Al. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Prentice Hall, 2002. 460.

FIGURA 11
REPRESENTACIÓN DEL CONO DE FRICCIÓN
CORRESPONDIENTE A UNA SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO
Y SU REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA



Representación del cono de fricción correspondiente a una superficie de deslizamiento potencial para los casos: a) cohesión nula, b) existencia de fricción y cohesión en el plano y c) influencia de una fuerza externa. d) representación estereográfica del cono de fricción.

Fuente: *Ingeniería Geológica*. 2 002.

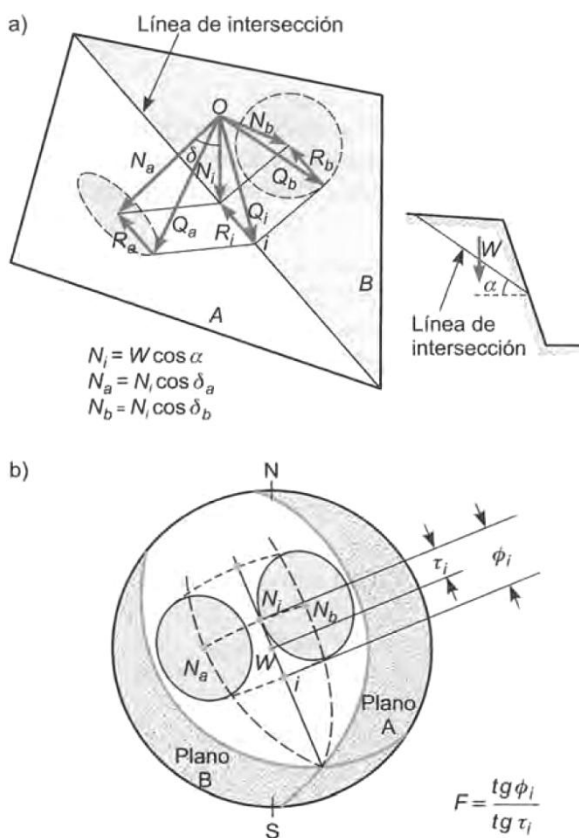
2) Análisis de estabilidad para mecanismo en cuña

Para este mecanismo se utiliza también el cono de fricción, este método es también conocido como el de Klaus John, en donde las fuerzas que afectan al macizo rocoso son:

“Los vectores N_i y Q_i y el vector peso W representan la fuerza resistente R (vector R_i) y la fuerza desestabilizadora S debida al peso (vector $W - N_i$) que actúan sobre la cuña”.²⁴ (Figura 12)

²⁴ *Ibíd.*, 461

FIGURA 12 REPRESENTACIÓN DE LOS CONOS DE FRICCIÓN SOBRE LOS PLANOS DE LA CUÑA



Representación de los conos de fricción y de las fuerzas actuantes sobre los planos de cuña. b) proyección estereográfica.

Fuente: *Ingeniería Geológica*. 2 002.

Para representar estos valores de las fuerzas resistentes y desestabilizadoras por medio de la red estereográfica debe realizarse lo siguiente:

- (i). Se representan en el estereograma los planos A y B y sus respectivos polos (N_a y N_b), se dibuja la línea de intersección entre los dos planos.

- (ii). Se trazan dos círculos máximos desde el punto de intersección de los dos planos hasta el polo de cada uno de ellos, N_a y N_b .
- (iii). Se dibujan los conos de fricción de cada plano alrededor de su polo correspondiente (marcando los grados correspondientes a \varnothing_a y \varnothing_b en todas las direcciones alrededor de N_a y N_b respectivamente y siempre según los círculos máximos)
- (iv). Los puntos en donde se cortan los conos de fricción con los círculos máximos trazados en el apartado 2 definen los puntos a y b.
- (v). Se traza un círculo máximo que pase por los puntos a y b. Este círculo representa el plano PQ que contiene a los vectores Q_a , Q_b y Q_i , que quedan representados en el estenograma respectivamente por O-a, O-b y O-i. i es el punto donde este círculo máximo corta a la línea de intersección de los planos A y B, O el centro del estereograma donde queda proyectado el peso W del bloque.
- (vi). Se traza un círculo máximo que una los polos N_a y N_b el corte de este plano con la línea de intersección determina el punto N_i (punto de aplicación del vector N_i resultante de las normales N_a y N_b sobre la línea de intersección) y este círculo representa el plano PN que contiene a N_a , N_b y N_i , queda así representado los tres vectores en el estereograma por O- N_a , O- N_b y O- N_i .

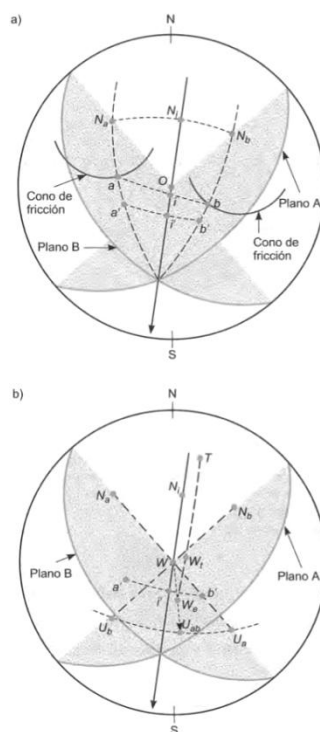
“Una vez dibujados los puntos N_i e i se puede medir el ángulo de rozamiento aparente

correspondiente a la cuña \varnothing_i , definido por los vectores N_i y Q_i el vector peso W define junto con N_i el ángulo τ_i . Con estos valores el coeficiente de seguridad queda definido como²⁵:

$$F = \frac{\text{tg}\varphi_i}{\text{tg}\tau_i}$$

A continuación, la figura 13 muestra el procedimiento anteriormente descrito.

FIGURA 13 REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA PARA EL ANÁLISIS DE CUÑAS



Representación estereográfica para el análisis de cuñas. Los datos correspondientes al procedimiento de cálculo de los vectores.

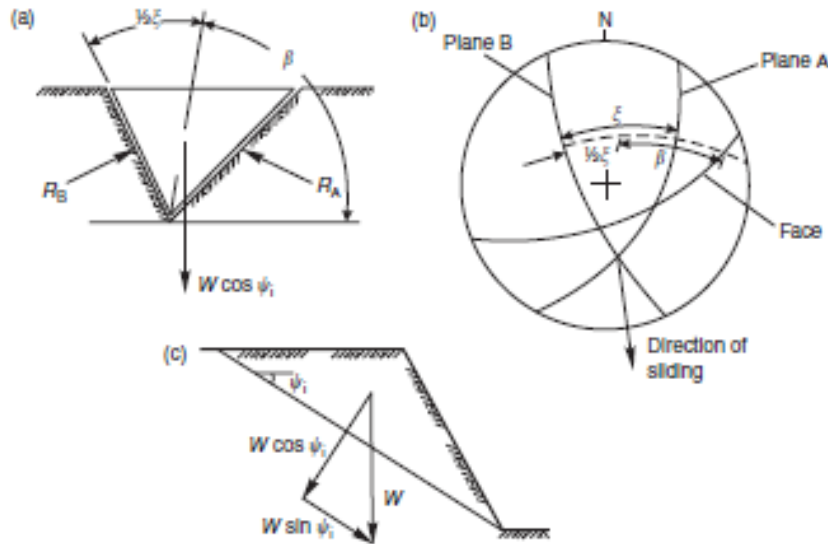
Fuente: *Ingeniería Geológica*. 2 002.

Además del método de Klaus John, está el propuesto por Hoek y Bray en el cual el cálculo del factor

²⁵ Luis I. Gonzáles de Vallejo, Et. Al. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Prentice Hall, 2002. 462.

de seguridad incluye el ángulo de fricción interno de los bloques que conforman a la cuña, el ángulo de inclinación de la intersección de los planos de la cuña y los ángulos ξ y β . En donde ξ y β están medidos a partir del círculo mayor de intersección entre los dos polos que conforman a los planos de la cuña. (Figura 14)

FIGURA 14
ANGULOS ξ Y β PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MECANISMO DE ROTURA EN CUÑA



a) vista de la cuña viendo hacia la cara, mostrando la definición de los ángulos ξ y β . b) estereofalsilla mostrando la medida de los ángulos ξ y β . c) sección cruzada de la cuña mostrando la resolución del peso de la cuña W .

Fuente: *Rock Slope Engineering, civil and mining. Based on the third edition by E Hoek and J Bray. 2 004.*

El factor de seguridad está dado por la siguiente relación:

$$F_s = [\sin \beta / \sin \xi^{1/2}] \times [\tan \Phi / \tan i]$$

3) Análisis de seguridad para mecanismo por vuelco

Para este análisis es necesario tomar en cuenta la geometría del bloque deslizante, en este caso su altura (h) y ancho (a). En este tipo de rotura, columnas o bloques de rocas son rotados sobre un punto pivote, β localizados sobre un plano inclinado. La figura 15 muestra lo anteriormente descrito.

Cada uno de los bloques que forman el talud puede sufrir inestabilidad por vuelco o por deslizamiento, en función de las fuerzas actuantes y de las dimensiones del bloque, las condiciones que determinan la estabilidad son las siguientes:

- (i). $\beta < \Phi$ y $a/h > \text{tg } \beta$; el bloque es estable y no tendera a deslizarse o volcarse.
- (ii). $\beta > \Phi$ y $a/h > \text{tg } \beta$; el bloque se deslizará, pero no volcará. $\beta < \Phi$ y $a/h < \text{tg } \beta$; el bloque volcará, pero no se deslizará.
- (iii). $\beta > \Phi$ y $a/h < \text{tg } \beta$; el bloque puede deslizarse y volcarse simultáneamente.

En donde β es el buzamiento del plano sobre donde descansa el bloque, Φ es el ángulo de fricción del plano.

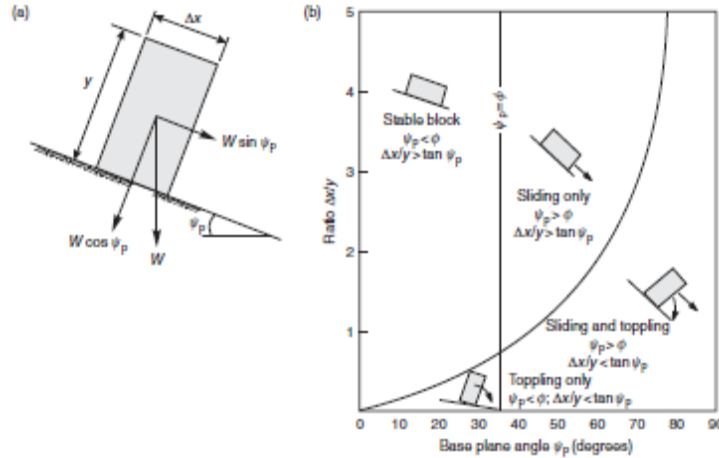
Para determinar el factor de seguridad se debe de tener en cuenta los momentos resistentes y desestabilizadores.

$F_s = \Sigma \text{ momentos que resisten} / \Sigma \text{ momentos que inducen.}$

$$F_s = W \cos \beta (a/2) / W \sin \beta (h/2)$$

$$F_s = (a/h) / \tan \beta$$

FIGURA 15 CONDICIONES QUE DETERMINAN LA ESTABILIDAD DEL BLOQUE



Referencia: a) geometría del bloque con un plano inclinado; b) condiciones de deslizamiento y volcamiento del bloque en un plano inclinado.

Fuente: *Rock Slope Engineering, civil and mining. Based on the third edition by E Hoek and J Bray. 2 004.*

En la creación de nuevas superficies de excavación resultan los estreses principales paralelos y perpendiculares a la superficie recién excavada, el potencial deslizamiento y volteo entre capas depende de la geometría de las mismas. Un análisis de estabilidad que incluya los parámetros geométricos y el ángulo de fricción entre los planos en equilibrio límite pueden ser utilizados para definir un factor geométrico de seguridad el cual está dado por la expresión:

$$F_s = \tan\Phi / \tan(\Psi + \beta - 90)$$

en donde:

Ψ = inclinación del talud

β = inclinación de las capas

Φ = ángulo de fricción entre planos.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Resultados

3.1.1 Litología

Se describen a continuación los hallazgos litológicos desde la unidad más antigua hasta la más reciente, del área de estudio con sus principales características.

a. Unidad de Lutitas

Se encuentra en un 32% (8 km²) del área de estudio y aflora al norte. En los alrededores de la aldea El Platanar y Bella Linda, se observan varios afloramientos. Se caracteriza por tener una topografía más suave con pendientes de 15° hasta los 30°, dan así una morfología ondulada. Las mejores exposiciones se encuentran al noreste y siguen la Franja Transversal del Norte (FTN).

Consiste en capas intercaladas de lutitas y areniscas con esporádicos lentes de caliza. El espesor de las capas varía entre 2 cm y 10 cm en las lutitas y los lentes de caliza tienen un espesor promedio de unos 20 cm.

Al norte, presenta estratificaciones con rumbo *NE-SW* buzante hacia el *NW*, a las sur estratificaciones con rumbo *NW-SE* buzante hacia el *NE*. La parte superficial de esta unidad se ha degradado completamente mezclándose con la materia orgánica da como resultado un suelo de color negro, en

algunas partes de esta unidad debajo de este material orgánico se puede observar restos de antiguos coluviones compuestos principalmente por clastos de lutitas rojizas.

Al profundizar, se encuentra una lutita de color gris con textura sedosa (Fotografía 1), puede clasificarse como una lutita pizarrosa, encontrándose completamente sana con una dureza clasificada a partir de los índices de campo como R3 (Roca moderadamente dura).

FOTOGRAFÍA 1 UNIDAD DE LUTITAS EN EL POJOM



Tomada por: Mario B. Daetz E. 2 104.

En el estudio geológico geotécnico realizado por ECOSISA se realizaron calicatas en el sitio de casa de máquinas con la finalidad de profundizar hasta los 3 m pero se alcanzaron, únicamente los dos, debido a la dificultad de excavar de forma manual por la dureza de la roca. Se observó que a la profundidad aproximada de 1,59 m empieza a brotar

agua entre la intercalación de estratos de lutita y areniscas de grano fino. (Fotografía 2)

Los contactos litológicos que evidencia esta unidad son de dos tipos. El primero localizado en la parte norte de tipo discordante con la Unidad de Calizas, el cual debió ser producido por un movimiento tectónico muy local. El segundo contacto es de tipo concordante, este contacto abarca casi la totalidad de la Unidad de Lutitas con la suprayacente Unidad de Calizas. La relación lateral existente con la Unidad de Calizas es concordante del tipo interdigitación.

FOTOGRAFÍA 2

CALICATA REALIZADA EN LA UNIDAD DE LUTITAS, SITIO CASA DE MÁQUINAS



Observaciones: la calicata fue realizada en el sitio propuesto para la casa de máquinas del proyecto Pojom.

Fuente: Estudio Geológico y Geotécnico del proyecto hidroeléctrico El Pojóm. 2 010

b. Unidad de Calizas

Cubre un 52% (13 km²) del área de estudio, afloran rocas caracterizadas por su color gris claro, mayormente de textura microcristalina, la mayoría de afloramientos se

encuentran brechados. Las mejores exposiciones se observan a lo largo del camino hacia la aldea El Platanar.

Su topografía es más abrupta con pendientes entre los 30° a 50° , con escasa presencia de escarpes completamente verticales. Su morfología es cárstica y genera la existencia de dolinas y sumideros.

Esta unidad aflora en los alrededores de las aldeas San Mateo e Ixquisis, presenta evidencias en superficie de carstificación, especialmente entre los planos de discontinuidad y estratificación. Posee una estratificación preferencial con rumbo *NE-SW* buzante hacia el *NW*. (Fotografía 3)

FOTOGRAFÍA 3

UNIDAD DE CALIZAS ESTRATIFICADAS SIN DISOLUCIÓN EN EL SITIO DE PRESA POJOM

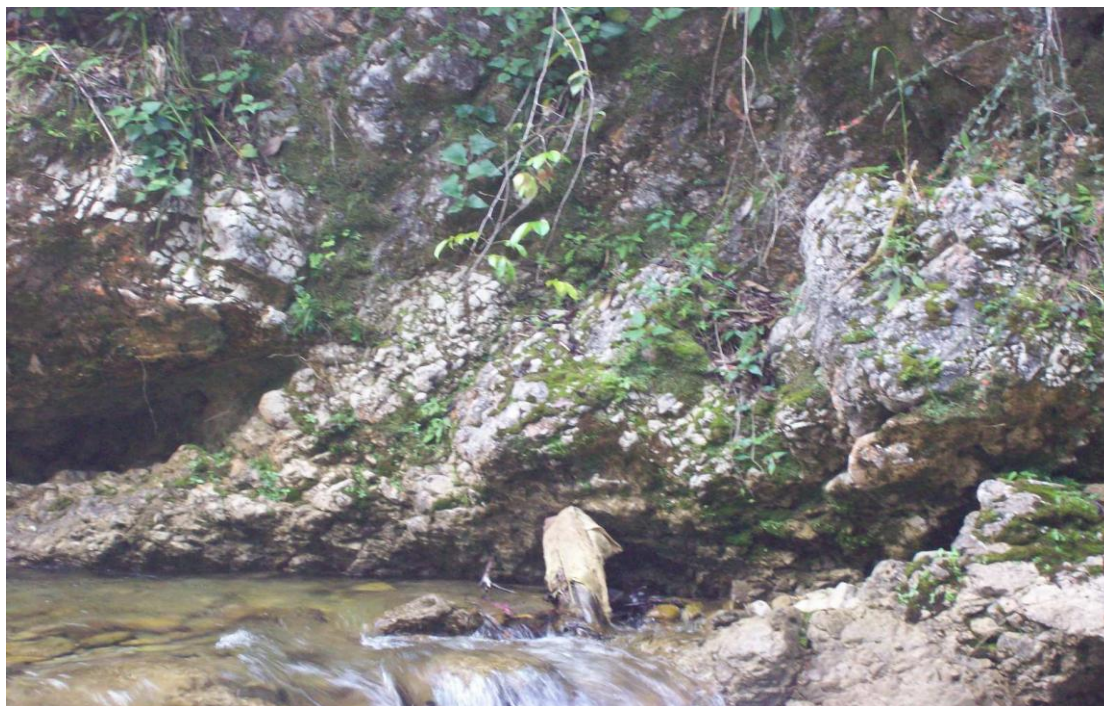


Tomada por: Mario B. Daetz E. 2 014.

Se puede observar una fracturación perteneciente a tres familias principales, la primera cuyos planos se encuentran con rumbo N 40° a N 50° la segunda con rumbo N 290° a N 300° y la tercera familia con rumbo N 330° a N350°.

Las brechas carbonáticas encontradas en el área tienen clastos angulares con tamaños aproximados de 5 cm a 7 cm de diámetro, los cuales se encuentran cementados en una matriz de grano fino, presenta una coloración entre amarillo y café en la parte superficial debido a la meteorización de las mismas, se encuentran de forma masiva y no tienen una estratificación claramente definida. (Fotografía 4)

FOTOGRAFÍA 4 BRECHAS CARBONÁTICAS EN EL ÁREA DEL PROYECTO POJOM



Tomada por: Mario B. Daetz E. 2 014

La unidad posee dos tipos de contactos estratigráficos el primero es de tipo discordante erosional entre la Unidad de Aluvión, y el segundo de tipo concordante transicional con la Unidad de Lutitas. Su relación lateral de esta unidad con la Unidad de Aluvión continúa siendo del tipo discordante erosional y con la Unidad de Lutitas concordante del tipo interdigitación.

c. Unidad de Depósitos Aluviales

Los depósitos aluviales cubren un aproximado de 4 km² (16%) se encuentran al sur de la aldea Pojom. La aldea Ixquisis se localiza asentada sobre una gran terraza aluvial la cual está cubierta por 30 cm de suelo orgánico en los sectores utilizados como potreros de pastoreo. (Fotografía 5)

Su topografía es completamente plana La unidad consiste principalmente en cantos, grava de composición calcárea subredondeados a redondeados y en menores cantidades arenas de grano medio a fino. El espesor del aluvión observado en el margen del río Pojom es de unos 2,50 m y sobreyace rocas calizas masivas. (Fotografía 6)

Los contactos estratigráficos y su relación lateral con la Unidad de Calizas es del tipo discordante erosional causado por el paso de los ríos Negro e Ixquisis.

FOTOGRAFÍA 5 UNIDAD ALUVIONAL EN EL ÁREA DEL PROYECTO POJOM



Tomada por: Mario B. Daetz E. 2 014.

FOTOGRAFÍA 6 UNIDAD ALUVIONAL LOCALIZADA EN MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO POJOM



Tomada por: Mario B. Daetz E. 2 014

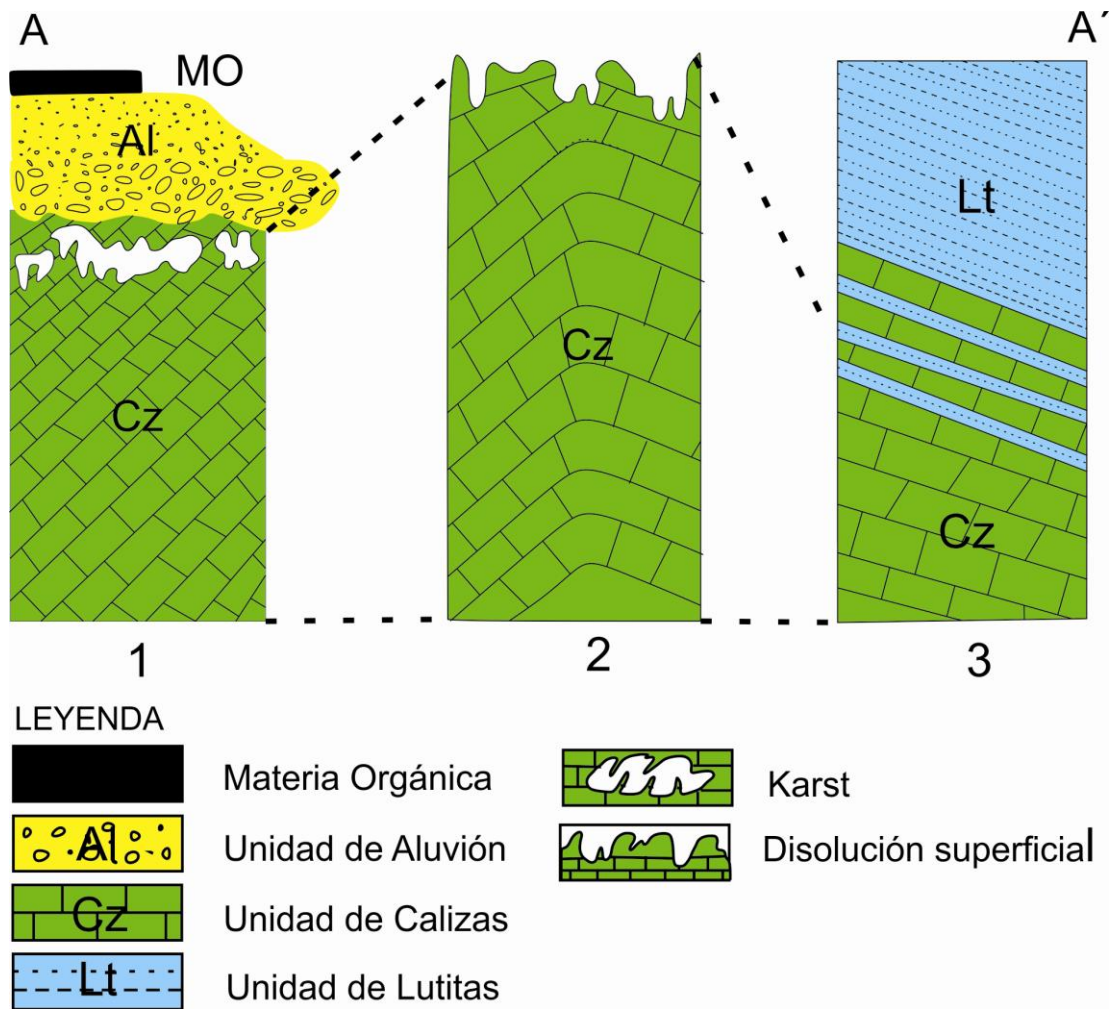
3.1.2 Contactos estratigráficos y relación espacial de las unidades

Los contactos estratigráficos encontrados en el área son de los siguientes tipos. El primer contacto es de tipo discordante erosional entre la Unidad de Aluvión y la Unidad de Calizas. El segundo contacto estratigráfico es del tipo concordante transicional entre las Unidades de Calizas y Lutitas. En la figura 16 se muestran las columnas estratigráficas generalizadas del área.

La columna estratigráfica 1 pertenece a la parte *NW* del área, tomado como guía el perfil geológico A-A' el cual es mostrado en el mapa geológico. En esta sección se observa el contacto discordante erosional entre la Unidad de Aluvión con la Unidad de Caliza y presencia de *karst* en calizas.

La columna 2 pertenece a la parte central del área, en esta sección no muestra contacto puesto que todo está conformado por la Unidad de Calizas, la parte superficial de esta unidad muestra disolución superficial moderada.

FIGURA 16
COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS GENERALIZADAS

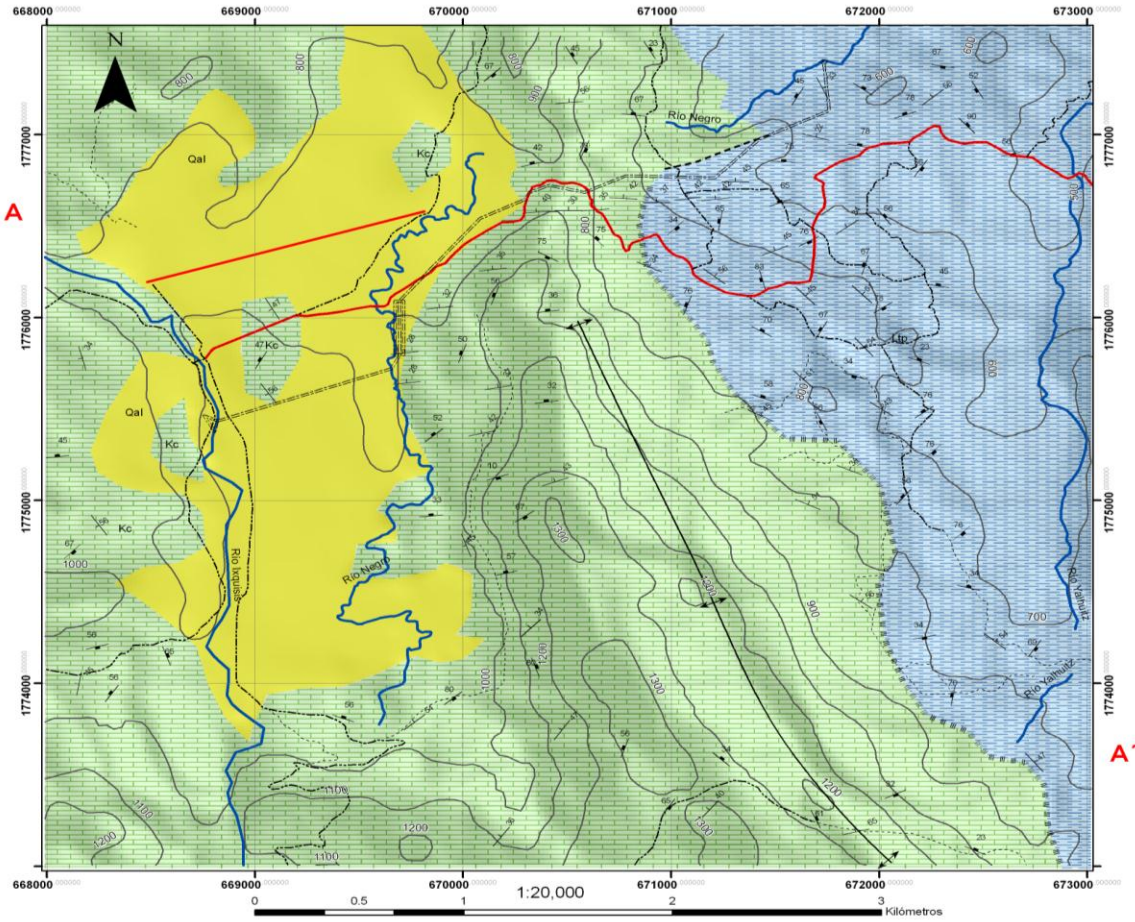


Fuente: Investigación de campo 2 014.

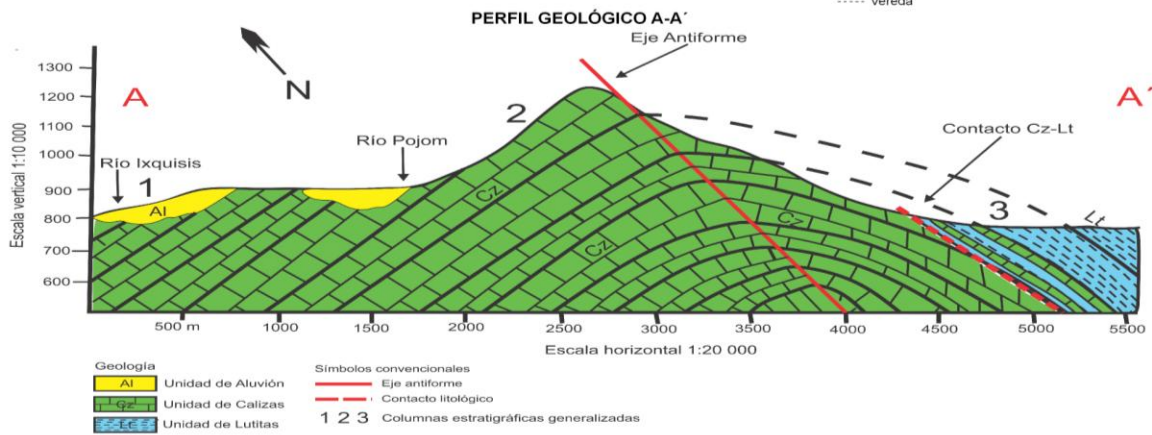
La columna 3 pertenece a la parte SE del área cercana al contacto concordante transicional entre lutitas y calizas.

A continuación, se muestra el mapa geológico del área.

MAPA 7 MAPA GEOLÓGICO



LEYENDA GEOLOGÍA	CONTACTOS LITOLÓGICOS	SÍMBOLOS GEOLÓGICOS	SÍMBOLOS CONVENCIONALES
Litotipo	TIPO	RUMBO Y BUZAMIENTO DE ESTRATOS	ESTRUCTURAS POJOM RIOS
Unidad de Aluvión	Concordante	RUMBO Y BUZAMIENTO DE FRACTURAS	PISTA DE ATERRIZAJE
Unidad de Calizas	Discordante	EJE DE ANTIFORME	VIAS
Unidad de Lutitas			TIPO
			FTN
			Terracería
			Vereda
			Rio Ixquis
			Rio Negro
			Rio Yalhuit

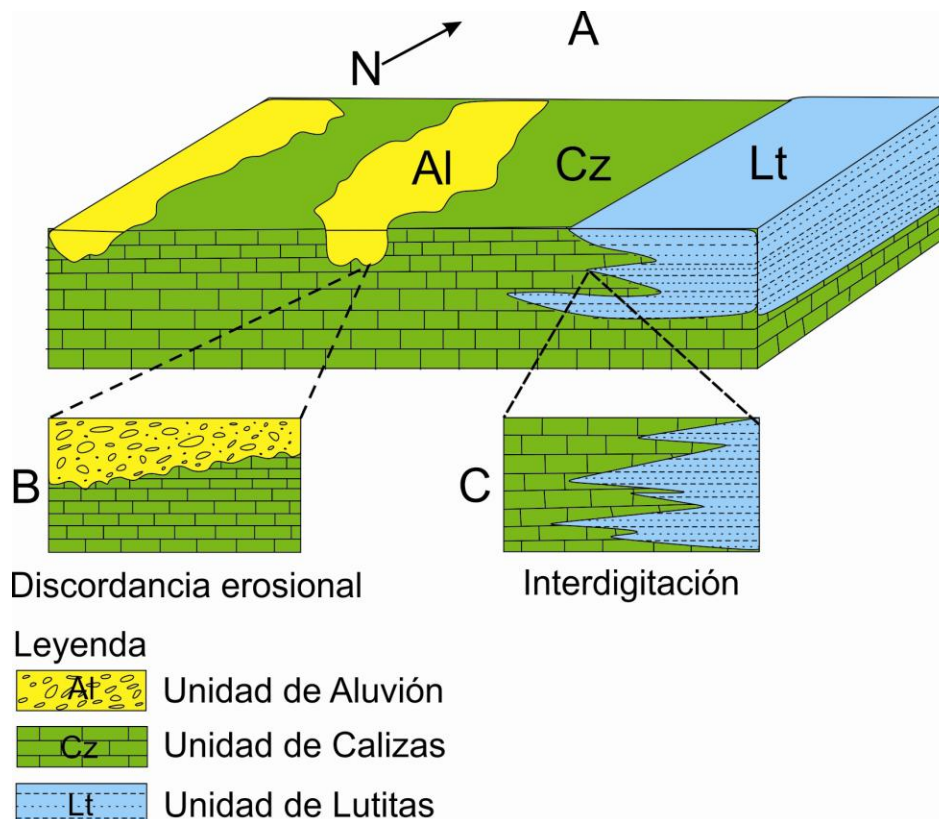


Fuente: Investigación de campo. 2 014.

Las relaciones entre unidades estratigráficas laterales del área están compuestas por dos tipos de contactos: el primero es discordante erosional entre la Unidad de Aluvión y la Unidad de Calizas, cuya erosión es causada por el paso de los ríos Ixquisis y Pojom y el segundo contacto es concordante del tipo interdigitación en donde las dos unidades adyacentes se mezclan entre sí interdigitándose, debido a diversas condiciones en el ambiente de depositación, en este caso constantes transgresiones y regresiones marinas.

La figura 17 muestra las relaciones laterales idealizadas en el área de estudio.

FIGURA 17
RELACIONES ENTRE UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS
LATERALES



Fuente: Investigación de campo 2 014.

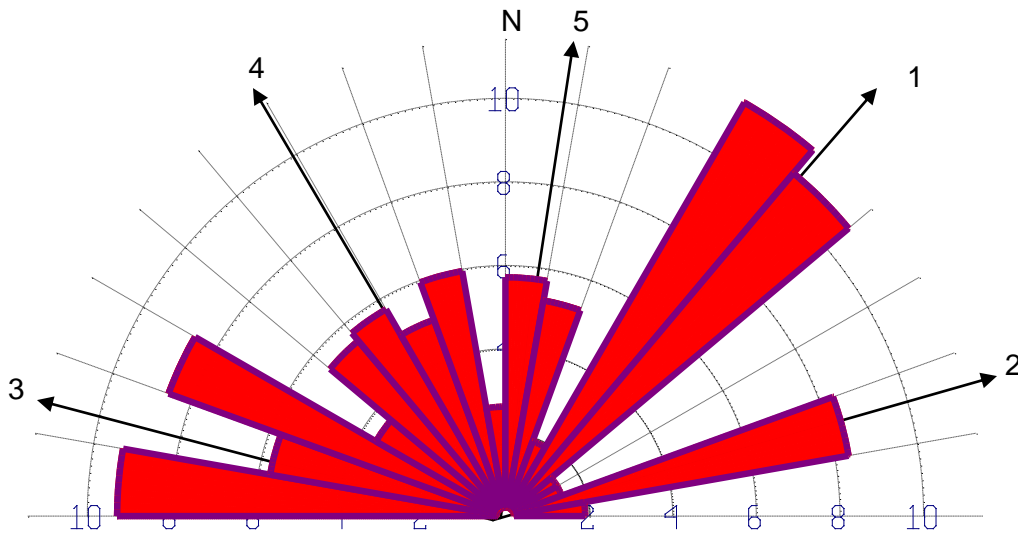
3.1.3 Geología estructural

En el siguiente apartado se describen los aspectos estructurales del área dentro de los cuales se tienen planos de fracturas y estratificaciones.

a. Planos de fracturas

Estos planos se encuentran en las Unidades de Caliza y Lutitas, se observan 5 familias cuyas orientaciones preferenciales son: 1. N 40°; 2. N 75°; 3. N 285°; 4. N 330°; 5. N 10°. (Figura 18)

FIGURA 18
DIAGRAMA DE ROSAS DE LOS PLANOS DE FRACTURAS EN CALIZAS Y LUTITAS

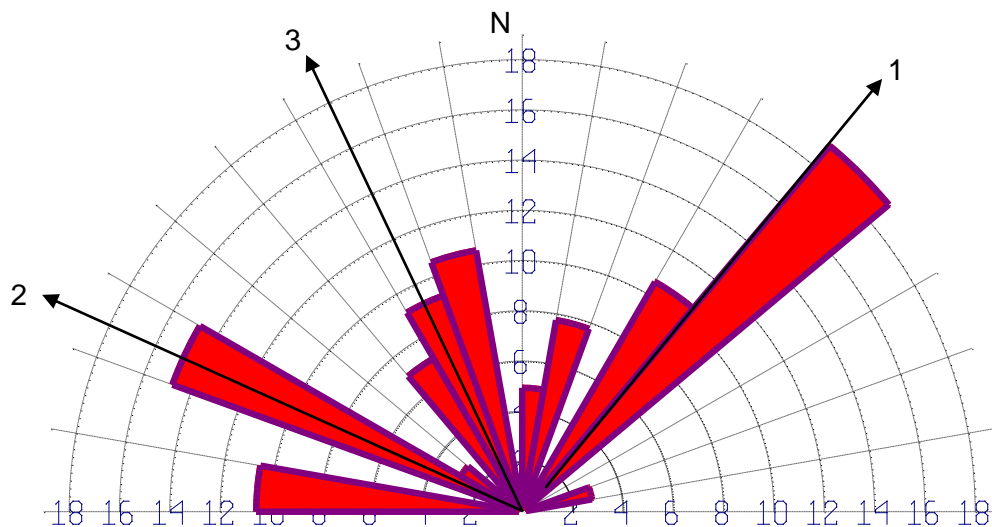


n= 420

Fuente: Investigación de campo 2 014.

En la Unidad de Calizas se obtuvieron 142 datos los cuales son mostrados en la siguiente figura en donde se observan tres familias principales las cuales son: 1. N 40°; 2. N 295°; 3. N 335°. (Figura 19)

FIGURA 19
DIAGRAMA DE ROSAS DE LOS PLANOS DE FRACTURA EN
UNIDAD DE CALIZAS

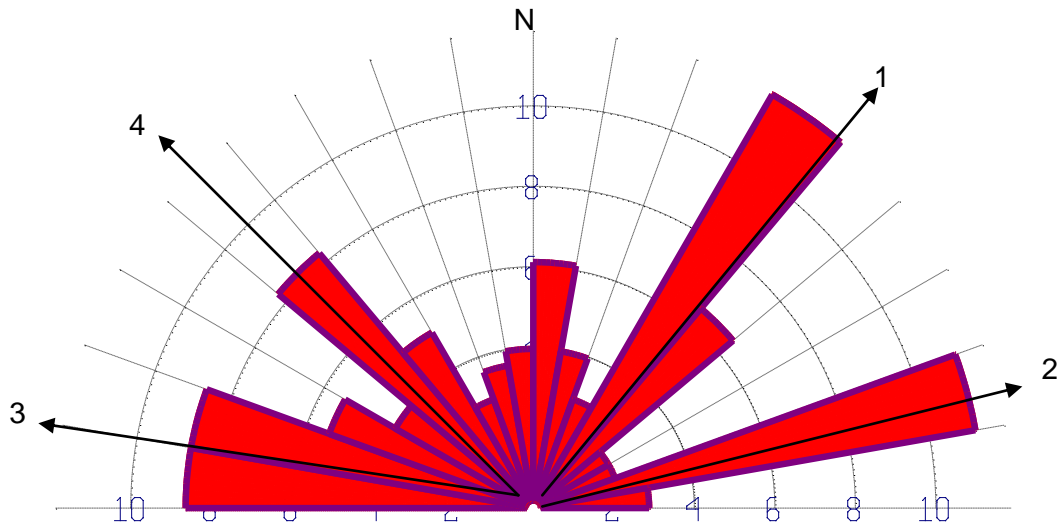


n=142

Fuente: Investigación de campo 2 014.

En la Unidad de Lutitas se tienen 278 datos; esta unidad es la que mayor cantidad de planos de fracturación presenta, el diagrama de rosas generado tiene direcciones preferenciales similares a los anteriores diagramas, lo cual indica que el área presenta una homogeneidad en la fracturación. Las direcciones preferenciales de fracturación muestran cuatro familias principales y son las siguientes: **1. N 40°; 2. N 75°; 3. N 280°; 4. N 315°.** (Figura 20)

FIGURA 20
DIAGRAMA DE ROSAS DE LOS PLANOS DE FRACTURA EN
UNIDAD DE LUTITAS



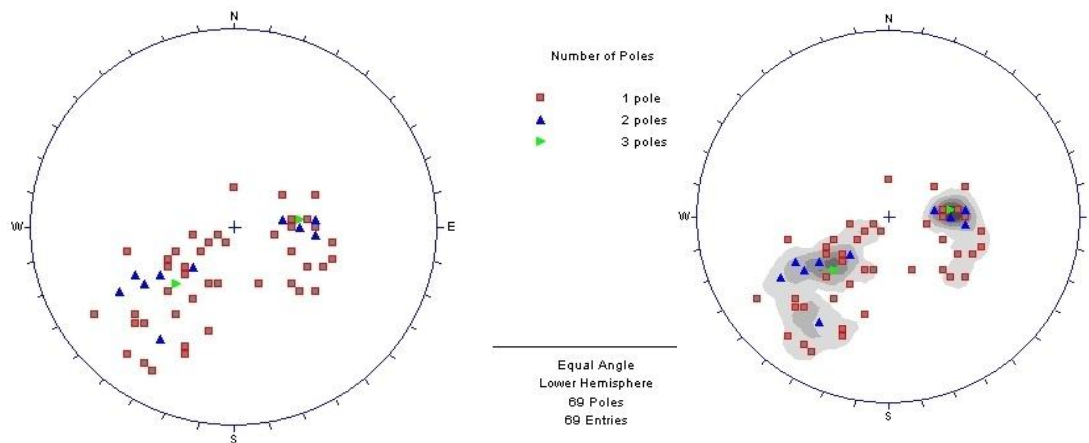
n=278

Fuente: Investigación de campo 2 014.

b. Planos de estratificación

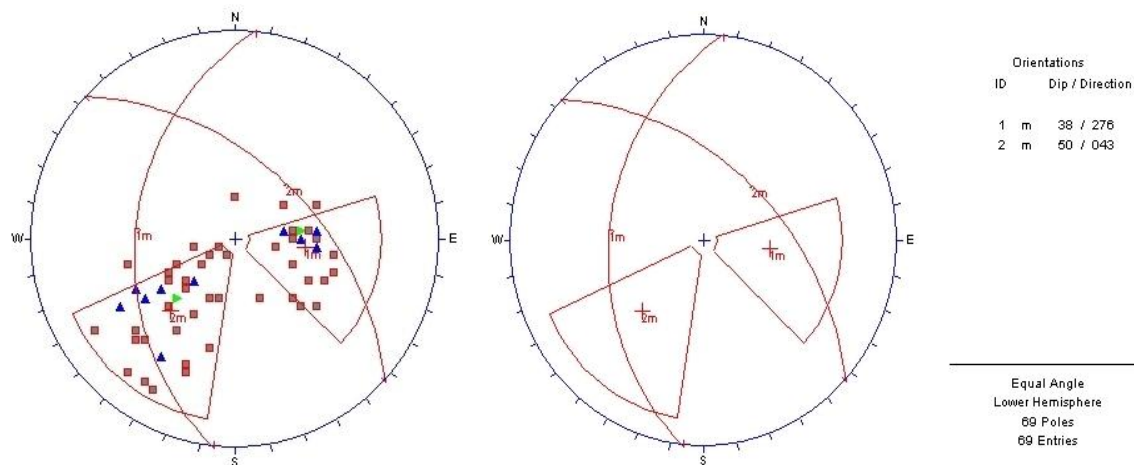
Para el análisis se tomaron 69 datos de los cuales se plotearon los polos correspondientes para cada uno (Figura 21) y muestran la existencia de un pliegue (antiforme) con esfuerzos compresivos en las direcciones **N 233** y **N 053**. El eje del pliegue corresponde a la dirección del esfuerzo distensivo, el cual se encuentra al **N323/32°** y se muestra en la figura 22.

FIGURA 21
POLOS Y DENSIDADES DE ESTRATIFICACIÓN



Fuente: Investigación de campo 2014.

FIGURA 22
DIRECCIÓN EJE DE PLIEGUE



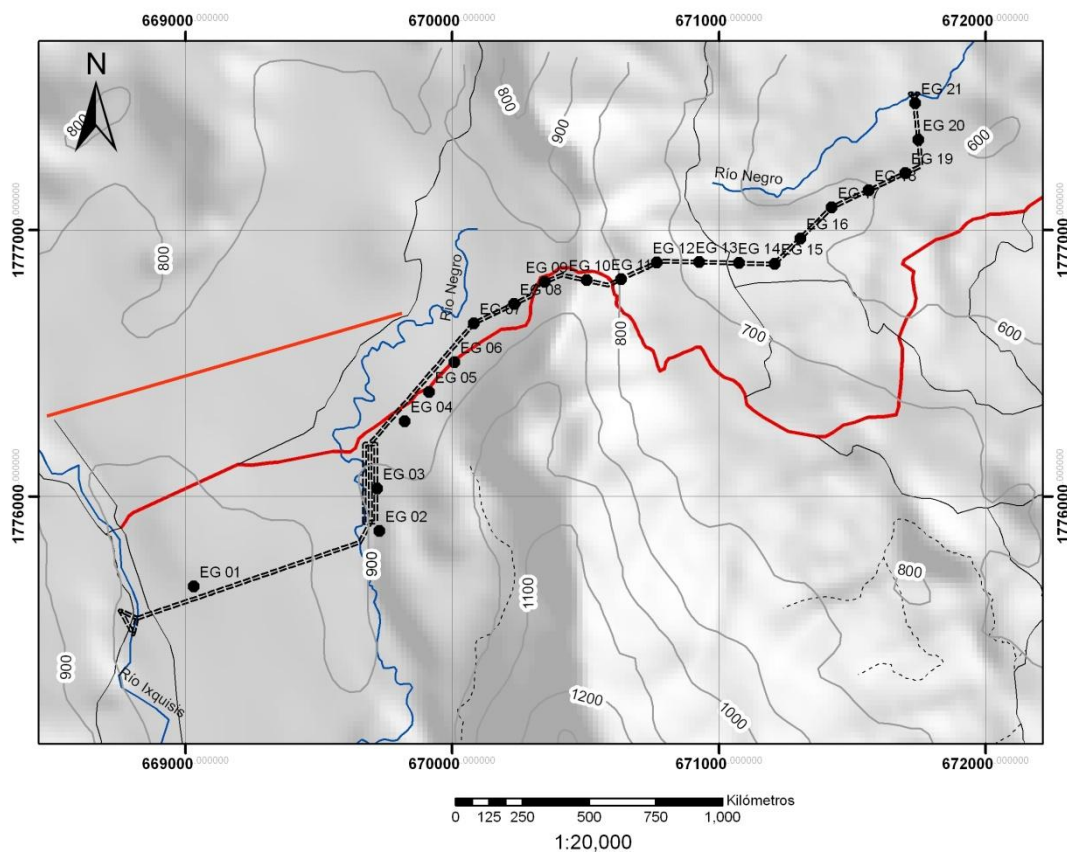
Fuente: Investigación de campo 2014.

3.1.4 Ubicación de macizos rocosos

Se cuenta con quince estaciones geomecánicas localizadas en afloramientos rocosos y seis estaciones que no fueron realizadas debido a que se encontraban en la Unidad de Aluvión y otras cubiertas por vegetación para estas estaciones no se puede aplicar el *RMR* debido a que la clasificación de la resistencia a partir de índices de campo las cataloga como suelo, haciendo un total de veintiún estaciones planteadas para el estudio. La ubicación de las estaciones se muestra en el mapa 8.

Las estaciones están ubicadas a lo largo del trazo de las obras civiles del proyecto como lo son canal de conducción, embalse, tubería de presión y casa de máquinas con el objetivo de clasificar geomecánicamente la calidad de los macizos rocosos y evaluar la estabilidad de los taludes, lo cual es necesario para validar los trazos propuestos en el proyecto.

MAPA 8 UBICACIÓN DE ESTACIONES GEOMECÁNICAS



SIMBOLOGÍA

- ===== ESTRUCTURAS POJOM
- PISTA DE ATERRIZAJE

VIAS

TIPO

- FTN
- Terracería
- Vereda

RIOS

Nombre

- Río Ixquisis
- Río Negro
- Río Yalhuitz

LEYENDA

- UBICACIÓN DE ESTACIONES GEOMECÁNICAS

Estación	Coordenadas		Material
	X	Y	
EG 1	609074	1775591	Caliza
EG 2	669729	1775761	Caliza
EG 3	669718	1775925	Caliza
EG 4	669886	1776173	Caliza
EG 6	670141	1776381	Caliza
EG 9	670350	1776696	Caliza
EG 10	670505	1776702	Caliza
EG 11	670634	1776707	Caliza
EG 12	670769	1776770	Caliza
EG 13	670927	1776748	Caliza
EG 14	671078	1776768	Lutitas
EG 15	671211	1776765	Lutitas
EG 16	671308	1776861	Lutitas
EG 19	671700	1777105	Lutitas
EG 21	671737	1777367	Lutitas

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

En la tabla 2 se muestran las características de las estaciones geomecánicas.

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES GEOMECAÑICAS

Estación	Coordenadas		Material	Talud	
	X	Y		Dir	Dip
EGM 1	609074	1775591	Caliza	N37E	67° E
EGM 2	669729	1775761	Caliza	N-S	80° W
EGM 3	669718	1775925	Caliza	N15E	67° NW
EGM 4	669886	1776173	Caliza	N27E	33° NW
EGM 5			Aluvión-área cubierta de vegetación		
EGM 6	670141	1776381	Caliza	N27E	53° NW
EGM 7	670081	1776542	Aluvión	***	***
EGM 8	670232	1776615	Aluvión	***	***
EGM 9	670350	1776696	Caliza	N20W	47° SW
EGM 10	670505	1776702	Caliza	N25E	68° SW
EGM 11	670634	1776707	Caliza	N-S	60° E
EGM 12	670769	1776770	Caliza	N20E	43° SE
EGM 13	670927	1776748	Caliza	N25W	37° NE
EGM 14	671078	1776768	Lutitas	N15E	25° SE
EGM 15	671211	1776765	Lutitas	N15E	25° SE
EGM 16	671308	1776861	Lutitas	S65E	33° NE
EGM 17			área cubierta de vegetación		
EGM 18			área cubierta de vegetación		
EGM 19	671700	1777105	Lutitas	N57E	32° NW
EGM 20			área cubierta de vegetación		
EGM 21	671737	1777367	Lutitas	N87E	37° NW

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

3.1.5 Resistencia de la roca

La resistencia de la matriz rocosa fue estimada *in situ*, con la utilización del martillo de geólogo, este procedimiento consta de golpear la roca “n” veces y comparar con las tablas propuestas por el *ISRM* (Método sugerido para la cuantificación y descripción de discontinuidades en macizos rocosos) desarrollado en el Capítulo 2 (Cuadro 1 Resistencias a partir de índices de campo),

para luego otorgar una ponderación en la tabla de clasificación de macizos rocosos de Bieniawski (1 989).

Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones geomecánicas se muestran en el cuadro 16 y en el mapa 9.

CUADRO 16
RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA

Resistencia de la matriz rocosa a partir de índices de campo											
EG	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 – 4,00	4,00 – 2,00	2,00 – 1,00	Compresión simple					
	C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 – 5,00	5,00 – 1,00	1,00 – 0,25	< 0,50	0,50 – 0,25	0,25 – 0,10
	Descripción	R ₆	R ₅	R ₄	R ₃	R ₂	R ₁	R ₀	S ₆	S ₅	S ₄
EG1			X								
EG2				X							
EG3				X							
EG4				X							
EG5	Suelo									X	
EG6				X							
EG7	Suelo										X
EG8	Suelo										X
EG9				X							
EG10			X								
EG11				X							
EG12				X							
EG13				X							
EG14					X						
EG15					X						
EG16					X						
EG17	Suelo								X		
EG18	Suelo								X		
EG19					X						
EG20	Suelo								X		
EG21					X						

S₄= Suelo rígido, se necesita una fuerte presión para hincar el dedo

S₅= Suelo muy rígido, con cierta presión puede marcarse con la uña.

S₆= Suelo duro, se marca con dificultad al presionar con la uña.

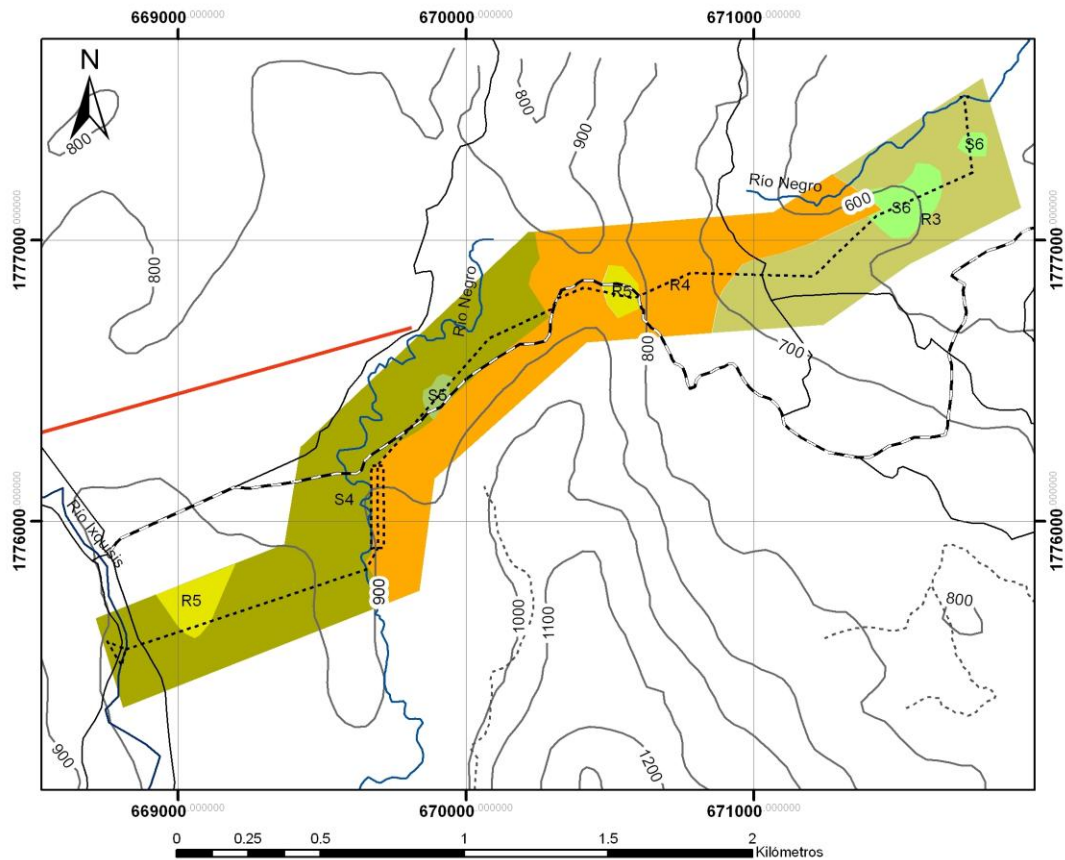
R₃= Roca moderadamente dura, no puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.

R₄= Roca dura, se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.

R₅= Roca muy dura, se requieren mucho golpes con el martillo para fracturarla.

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

MAPA 9 CLASIFICACIÓN DE LA ROCA EN BASE A PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LA MATRIZ



SIMBOLOGÍA

- ESTRUCTURAS POJOM
- PISTA DE ATERRIZAJE

VÍAS

TIPO

- FTN
- Terracería
- Vereda

RÍOS

Nombre

- Río Ixquisis
- Río Negro
- Río Yalhuitz

LEYENDA

IDENTIFICACIÓN DE CAMPO

CLASE

- S4
- S6
- S5
- R3
- R4
- R5

ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA (IDENTIFICACIÓN DE CAMPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA)				
TIPO	ZONAS (Descripción Litológica)	CLASE	NIVEL FREÁTICO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)
Suelo rígido S4	Limos y arcillas arenosas y clastos de composición calcárea (calizas)	S4	No se detectó nivel freático	0,10 - 0,25
Suelo muy rígido S5	Limos y arcillas mezclados con clastos calcáreos con meteorización avanzada	S5	No se detectó nivel freático	0,25 - 0,50
Suelos duros S6	Limos y arcillas arenosas, mezcladas con materia orgánica	S6	No se detectó nivel freático	< 0,50
Roca moderadamente dura R3	Lutitas intercaladas con areniscas de grano fino	R3	Nivel próximo a superficie 1.5 m	25 - 50
Roca dura R4	Calizas brechificadas, cementadas con una matriz de grano fino	R4	No se detectó nivel freático	50 - 100
Roca muy dura R5	Calizas cristalinas, masivas	R5	No se detectó nivel freático	100 - 250

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

3.1.6 Caracterización geomecánica

Se realizó la clasificación para cada una de las estaciones geomecánicas, describiendo su *RMR* y los factores de ajuste para el *SRM*.

a. Clasificación de Bienawski (1 989) o sistema *RMR*

Permite hacer una clasificación de la calidad geomecánica de las rocas *in situ*. Se utiliza normalmente en la construcción de túneles, taludes y cimentaciones, para lograr esta clasificación se debe de dar una ponderación a cada uno de los parámetros que compone al *RMR*. Como ejemplo se muestra el cuadro 17 que corresponde a la estación geomecánica 11 (EG 11)

CUADRO 17
CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA *RMR*

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA <i>RMR</i> (BIENIAWSKI 1 989) EG # 11								
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple	
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00
	puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%	
	puntuación		20	17	13	6	3	
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m	
	puntuación		20	15	10	8	5	
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0 m	3,0 m - 10,0 m	10,0 m - 20,0 m	> 20 m	
	puntuación		6	4	2	1	0	
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 5 mm	> 5 mm	
	puntuación		6	5	3	1	0	
	Rugosidad		muy rugosa	rugosa	ligeramente rugosa	ondulada	suave	
	puntuación		6	5	3	1	0	
5	Relleno		ninguno	relleno duro < 5 mm	relleno duro > 5 mm	relleno blando < 5 mm	relleno blando > 5 mm	
	puntuación		6	4	2	2	0	
	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado	
puntuación		6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas
	Puntuación		15	15	10	7	4	0

TOTAL PUNTAJE **54**

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

Como se observa en el cuadro 18 los valores ponderados dan un puntaje de 54 al cual se le aplico la corrección por la orientación de las discontinuidades (procedimiento descrito en el capítulo 2, cuadro 10 Correcciones *RMR* para taludes), dando como resultado final un puntaje de 49 para el cual se establece como un macizo clase III calidad media.

CUADRO 18 CORRECCIONES *RMR* PARA TALUDES

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 11

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	54
TALUDES	-5
TOTAL	49

CLASIFICACIÓN INDICE DE CALIDAD *RMR*

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: Investigación de campo. 2 014.

Este mismo procedimiento se realizó con las demás estaciones geomecánicas, los resultados ya corregidos para cada una de las estaciones se muestran en la tabla 4.

TABLA 4
RESULTADOS RMR OBTENIDOS PARA LAS ESTACIONES
GEOMECÁNICAS

Coordenadas		Material	Talud		RMR	Calidad geotécnica
X	Y		Dir	Dip		
609074	1775591	Caliza	N37E	67° E	37	Mala
669729	1775761	Caliza	N-S	80° W	11	Muy mala
669718	1775925	Caliza	N15E	67° NW	52	Media
669886	1776173	Caliza	N27E	33° NW	52	Media
670141	1776381	Caliza	N27E	53° NW	29	Mala
670350	1776696	Caliza	N20W	N20W	49	Media
670505	1776702	Caliza	N25E	N25E	57	Media
670634	1776707	Caliza	N-S	N-S	49	Media
670769	1776770	Caliza	N20E	N20E	32	Mala
670927	1776748	Caliza	N25W	N25W	34	Mala
671078	1776768	Lutitas	N15E	N15E	18	Muy mala
671211	1776765	Lutitas	N15E	N15E	18	Muy mala
671308	1776861	Lutitas	S65E	S65E	38	Mala
671700	1777105	Lutitas	N57E	32° NW	42	Media
671737	1777367	Lutitas	N87E	37° NW	42	Media

Fuente Investigación de campo. 2 015.

Como se observa en la tabla 5 se tiene una mayor porcentaje de macizos clase III calidad media, seguido por macizos clase IV calidad mala y finalizando con macizos clase V calidad muy mala.

TABLA 5
PORCENTAJES DE CALIDAD RMR DE LOS MACIZOS ROCOSOS

CLASE	CALIDAD RMR	CANTIDAD	%
III	Media	7	47
IV	Mala	5	33
V	Muy mala	3	20

Fuente: Investigación de campo. 2 015.

b. Clasificación de Romana o sistema SMR

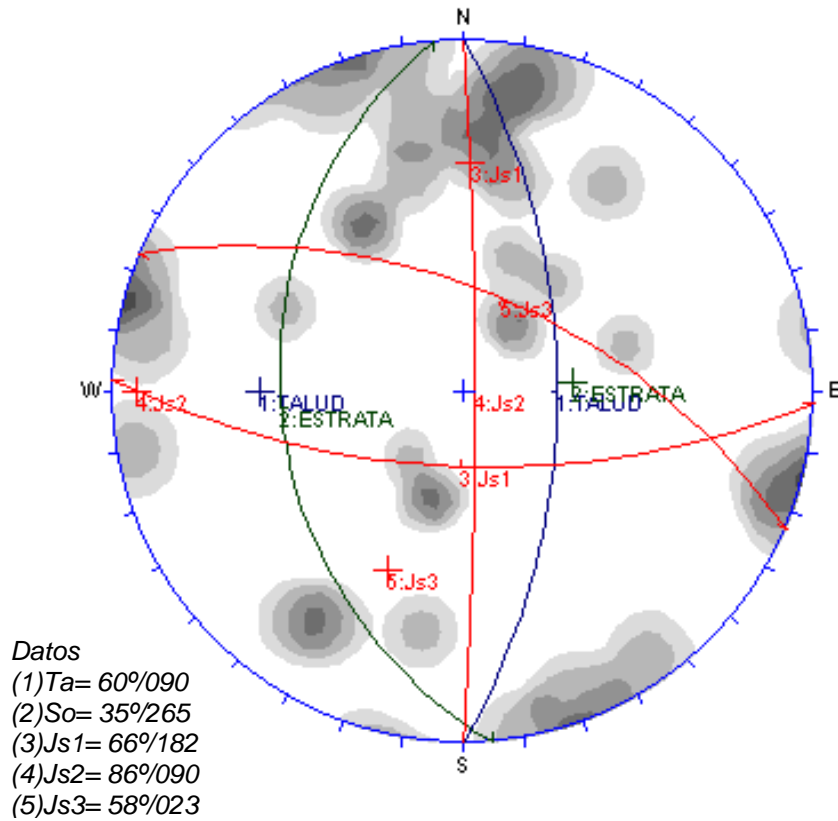
El SMR se caracteriza por su carácter discreto, asignando a cada parámetro una determinada puntuación en

función del valor que adopta la variable que controla dicho parámetro. Como consecuencia se observa que pequeños cambios en el valor de dicha variable da lugar a notables variaciones del parámetro en cuestión, lo que ocasiona cambios en la calidad del macizo rocoso. Como ejemplo se utilizó la clasificación *RMR* de la estación geomecánica 11 (EG 11) que tiene un *RMR* básico de 54 puntos. (Cuadro 17)

Como se logró observar en la clasificación *RMR* se tiene un puntaje de 54 el cual es el *RMR* básico, este se encuentra sin corrección por el ajuste de las discontinuidades. Para cuantificar el *SMR* se realizó lo siguiente.

Se analizaron por medio de estereogramas los posibles mecanismos de rotura presentes en el talud, determinando la presencia de las familias de discontinuidades que mostraron para este caso roturas del tipo planar, cuña y vuelco. (Figura 23)

FIGURA 23
ESTEREOGRAMA DE LA EG 11 CON LOS MECANISMOS DE ROTURA



Fuente: *Dips*, investigación de campo. 2 015.

Mecanismo planar = Js2 posible

Mecanismo de vuelco = So posible

Mecanismo de cuña = Js1 y Js3 estable

Al analizar los mecanismos de rotura tenemos que la rotura planar es posible al igual que la de vuelco, la rotura en cuña es estable por lo que no calculamos el *SMR* para este mecanismo. Para el cálculo de *F1* en el mecanismo planar (*Ta* y *Js2*) se tiene la siguiente relación:

$$F1 = (1 - \text{sen } A)^2$$

Donde $A = a_j - a_s$, (a_j) la dirección del buzamiento de la junta y dirección del buzamiento de talud (a_s). F_1 depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas 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)

Entonces se tiene que:

$$A = 90^\circ - 90^\circ$$

$$A = 0$$

$$F_1 = (1 - \sin 0)^\circ$$

$$F_1 = 1$$

Cumple con el enunciado del paralelismo entre el rumbo de las juntas y la cara del talud.

Para F_2 depende del buzamiento de la junta en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de la probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta. Varía entre 1,00 (para juntas con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para juntas con buzamiento inferior a 20°).

Si J_s2 tiene un buzamiento de 86° por lo tanto F_2 sería igual a 1.

Para F_3 se utiliza la relación entre los buzamientos de la junta y el talud, el cual está dado por medio de los valores propuestos por Bieniawski que siempre son negativos. (Ver cuadro 13)

Para la rotura planar el enunciado es el siguiente:

$F_3 = b_j - b_s$ en donde b_j es el buzamiento de la junta y b_s buzamiento del talud.

$$F3 = b_j - b_s$$

$$F3 = 86^\circ - 60^\circ$$

$$F3 = 26^\circ$$

Y F4 depende del ajuste por los métodos de excavación, que para todos los casos en el estudio se trabajaron como un método de voladura mecanizada las cuales no tienen ninguna influencia sobre la estabilidad del talud por lo cual su valor es cero.

Por lo que para el SRM para el mecanismo planar queda de la siguiente manera:

$$SMR = RMR(\text{básico}) + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

$$SMR_{(EG\ 11)} = 54 + (1 \times 1 \times 0) + 0$$

$$SMR_{(EG\ 11)} = 54 - 0 + 0$$

$$SMR_{(EG\ 11)} = 54$$

Obtenido el resultado se establece que el macizo de la estación geomecánica 11 (EG 11) se clasifica en el *SMR* como clase III calidad normal, las características de esta estación son las siguientes: parcialmente estable con algunas juntas o muchas cuñas necesitando un soporte o tratamiento sistemático. El resto de estaciones geomecánicas se muestran en la siguiente tabla 6.

TABLA 6
RESULTADOS SMR OBTENIDOS PARA LAS ESTACIONES
GEOMECÁNICAS

Estación	Coordenadas		Material	Talud		SMR	Descripción	Clase
	X	Y		Dir	Dip			
EG 1	609074	1775591	Caliza	N37E	67° E	57	Normal	III
EG 2	669729	1775761	Caliza	N-S	80° W	20	Muy mala	V
EG 3	669718	1775925	Caliza	N15E	67° NW	21	Mala	IV
EG 4	669886	1776173	Caliza	N27E	33° NW	14	Muy mala	V
EG 6	670141	1776381	Caliza	N27E	53° NW	42	Normal	III
EG 9	670350	1776696	Caliza	N20W	N20W	24	Mala	IV
EG 10	670505	1776702	Caliza	N25E	N25E	59	Normal	III
EG 11	670634	1776707	Caliza	N-S	N-S	54	Normal	III
EG 12	670769	1776770	Caliza	N20E	N20E	57	Normal	III
EG 13	670927	1776748	Caliza	N25W	N25W	54	Normal	III
EG 14	671078	1776768	Lutitas	N15E	N15E	43	Normal	III
EG 15	671211	1776765	Lutitas	N15E	N15E	43	Normal	III
EG 16	671308	1776861	Lutitas	S65E	S65E	40	Mala	IV
EG 19	671700	1777105	Lutitas	N57E	32° NW	46	Normal	III
EG 21	671737	1777367	Lutitas	N87E	37° NW	33	Mala	IV

Fuente: Investigación de campo. 2 015.

La tabla 7 se muestra un mayor porcentaje de macizos clase III calidad media, seguido por macizos clase IV calidad mala.

TABLA 7
PORCENTAJES DE CALIDAD SMR DE LOS MACIZOS ROCOSOS

CLASE	CALIDAD SMR	CANTIDAD	%
III	Normal	9	60
IV	Mala	4	27
V	Muy mala	2	13

Fuente: Investigación de campo. 2 015

3.1.7 Ángulo de fricción

Para determinar la posibilidad y estabilidad de los mecanismos de rotura, se utilizaron tres datos: el primero teórico el cual se puede conseguir a través de varios autores en libros de

mecánica de rocas; el segundo por medio de diagramas estereográficos de las diferentes discontinuidades, dentro de las cuales se identificaron las familias conjugadas para su determinación. La tercera forma, la cual se conoce como *Tilt test* propuesto por Kliche (1 999) el cual consiste en obtener el ángulo con el cual se inicia un deslizamiento de una cara de la junta con respecto a la otra. (Tabla 8)

TABLA 8
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ESTIMADO

Ángulo de fricción interna			
Litología	Vallejo Gonzales Waltathan (1 999) Rahn (1 986) Goodman (1 989)	Estereofalsillas con datos de campo	Medidas en campo (Ensayo <i>Tilt-Test</i>)
Calizas	35° - 50°	28° - 30°	32° - 36°
Lutitas	40° - 60° 15° - 25°*	52° - 53°	47° - 49°

*en superficies de estratificación y esquistosidad

Fuente: Investigación de campo. 2 015.

3.1.8 Mecanismos de rotura

Se identificaron los mecanismos de “falla” que afectan a los macizos rocosos de las estaciones geomecánicas por medio de las “discontinuidades” presentes y con la utilización de proyecciones estereográficas para determinar las densidades o bien las familias de discontinuidades presentes en las estaciones geomecánicas. Los mecanismos de rotura encontrados en las estaciones geomecánicas (ver tabla 9).

TABLA 9
MECANISMOS DE ROTURA ENCONTRADOS CON
POSIBILIDADES DE OCURRENCIA

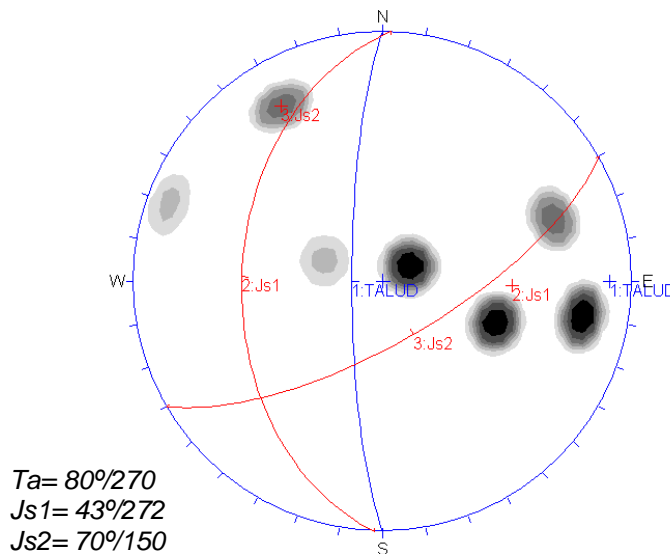
EG	Familias	Dip/ Dir planos	Planar	Cuña	Vuelco
EG 1	So	21/176	**	**	**
	Js1	47/210	**	**	posible
	Js2	37/112	**	**	**
EG 2	So	80/270	**	**	**
	Js1	43/272	posible	**	**
	Js2	70/150			
EG 3	So	28/263	**	**	**
	Js1	76/010	**	posible	**
	Js2	52/230	**	posible	**
EG 4	So	32/263	**	posible	**
	Js1	88/250	**	posible	**
	Js2	50/200	**	posible	**
EG 6	So	35/263	posible	posible	**
	Js 1	81/100	**	**	posible
	Js 2	62/278	posible	**	**
	Js 3	53/180	**	posible	**
EG 9	So	40/265	posible	posible	**
	Js 1	51/315	**	posible	**
	Js 2	83/135	**	posible	**
EG 10	So	30/270	**	**	posible
	Js 1	75/119	posible	**	**
	Js 2	74/310	**	**	posible
EG 11	So	35/265	**	**	posible
	Js 1	66/182	**	posible	**
	Js 2	86/090	posible	**	**
	Js 3	58/023	**	posible	**
EG 12	So	42/273	**	**	posible
	Js 1	75/315	**	**	posible
	Js 2	75/112	posible	**	**
EG 13	So	37/270	**	**	posible
	Js 1	58/259	**	**	posible
	Js 2	59/126	**	posible	**
	Js 3	81/349	**	posible	**
EG 14	So	42/263	**	**	posible
	Js 1	56/248	**	**	posible
	Js 2	72/174	**	**	**
	Js 3	74/328	**	**	**
EG 15	So	42/263	**	**	posible
	Js 1	83/328	**	**	**
	Js 2	79/148	**	**	**
EG 16	So	45/270	**	posible	**
	Js 1	54/070	**	posible	**
	Js 2	75/273	**	posible	**
EG 19	So	22/285	posible	**	**
	Js 1	75/233	**	posible	**
	Js 2	68/302	**	posible	**
EG 21	So	33/335	posible	**	**
	Js 1	73/305	**	posible	**
	Js 2	64/231	**	posible	**

Fuente: Investigación de campo. 2 015.

Para el análisis cinemático se utilizó la metodología descrita en el capítulo 2. Se optó por mostrar un ejemplo de cada uno de los mecanismos de falla con los datos obtenidos en el campo.

Con el mecanismo de rotura planar se utilizó la estación geomecánica 2 (EG 2) la cual corresponde a un afloramiento con una potencia aproximada de 5 m de altura por 8 m de ancho, compuesto por calizas con meteorización grado II con una clasificación geotécnica grado IV calidad muy mala, la familia de diaclasas que cumplen con las condiciones para una rotura planar fueron denominadas como Js1, que tienen una orientación paralela a la cara del talud. (Figura 24)

FIGURA 24
ESTEREOGRAMA DE LA EG 2 CON LOS MECANISMOS DE ROTURA



Fuente: *Dips*, investigación de campo. 2 015.

La representación estereográfica de la figura 25 muestra el talud con dirección $80^\circ/270$ y la familia de juntas (Js1) con

dirección $43^{\circ}/272$, la cual indica la posibilidad de que ocurra un mecanismo de rotura planar. Para confirmar dicho movimiento se realizó la comprobación de los enunciados descritos en el capítulo 2 en donde se deberá de cumplir con la condición:

$$A_p = A_t \pm 20^{\circ}$$

$$\psi_f > \psi_p$$

$$\psi_p > \emptyset$$

$$\text{Si } A_p = N272$$

$$A_t = N270$$

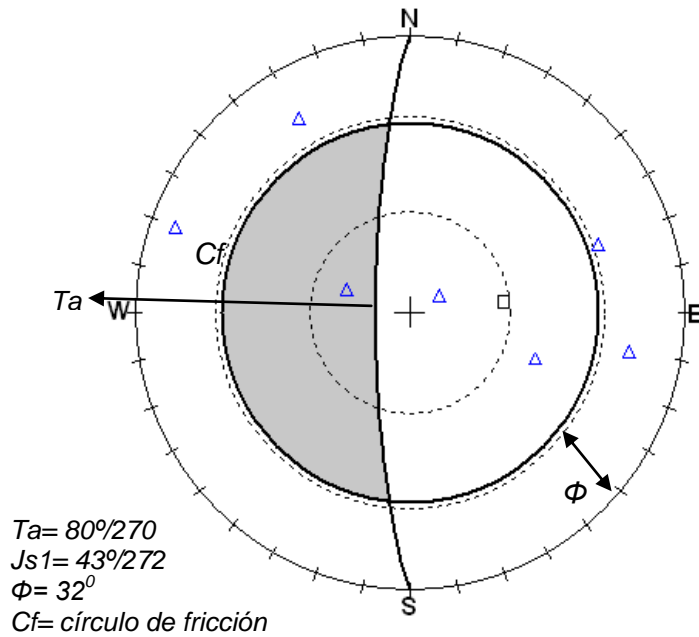
$$\psi_f = 80^{\circ}$$

$$\psi_p = 43^{\circ}$$

$$\emptyset = 32^{\circ}$$

En base a esto se establece que el movimiento planar es posible.

FIGURA 25
MECANISMO PLANAR ESTACIÓN GEOMECÁNICA 2 (EG 2)

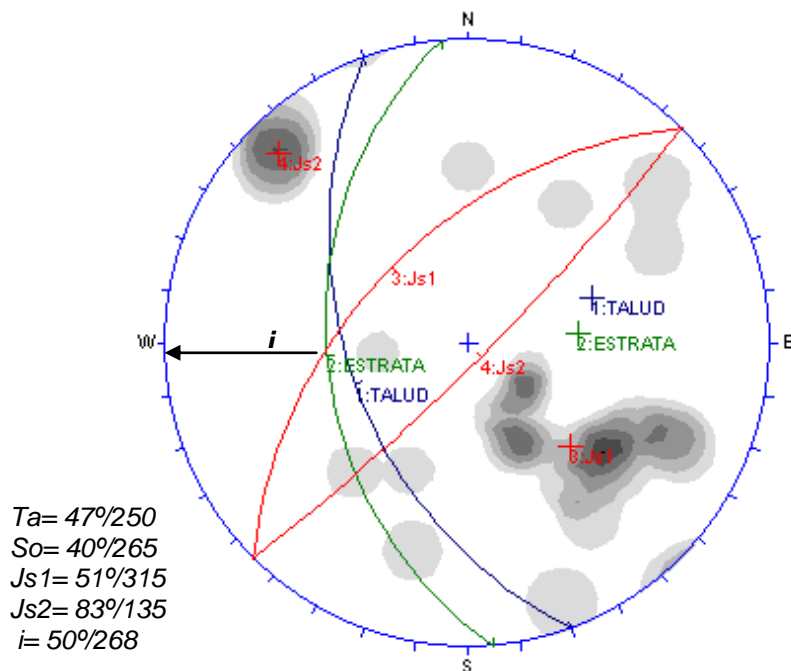


Referencia: mostrando los polos de las familias que afectan a la estación geomecánica 2, se muestra la dirección del talud, así como también el círculo de fricción y el área de inestabilidad de gris.

Fuente: Investigación de campo 2 015, utilizando el *software Rockpak III*.

En el mecanismo de rotura por cuña se tomó como ejemplo la estación geomecánica 9 (EG 9) la cual corresponde a un afloramiento con una potencia aproximada de 4 m de altura por 6 m de ancho, compuesto por calizas con meteorización grado III con una clasificación geotécnica grado III calidad media, la familia de diaclasas que cumplen con las condiciones para una rotura en cuña fueron denominadas como So y Js1. (Figura 26)

FIGURA 26
ESTEREOGRAMA DE LA EG 9 CON LOS MECANISMOS DE
ROTURA



Fuente: *Dips*, investigación de campo. 2 015.

La representación estereográfica de la figura 27 muestra el talud con dirección $47^\circ/250$ y la familia de juntas ($Js1$) con dirección $51^\circ/315$ y So con $40^\circ/265$ las cuales indican la posibilidad de que ocurra un mecanismo de rotura en cuña. Para confirmar dicho movimiento se realizó la comprobación de los enunciados descritos en el capítulo 2 en donde se deberá de cumplir con la condición:

$$\alpha_i = \pm \alpha_f \text{ (que aflore hacia la cara del talud)}$$

$$\psi_i < \psi_f$$

$$\psi_i > \Phi$$

$$\text{Si } \alpha_i = 40^\circ/270$$

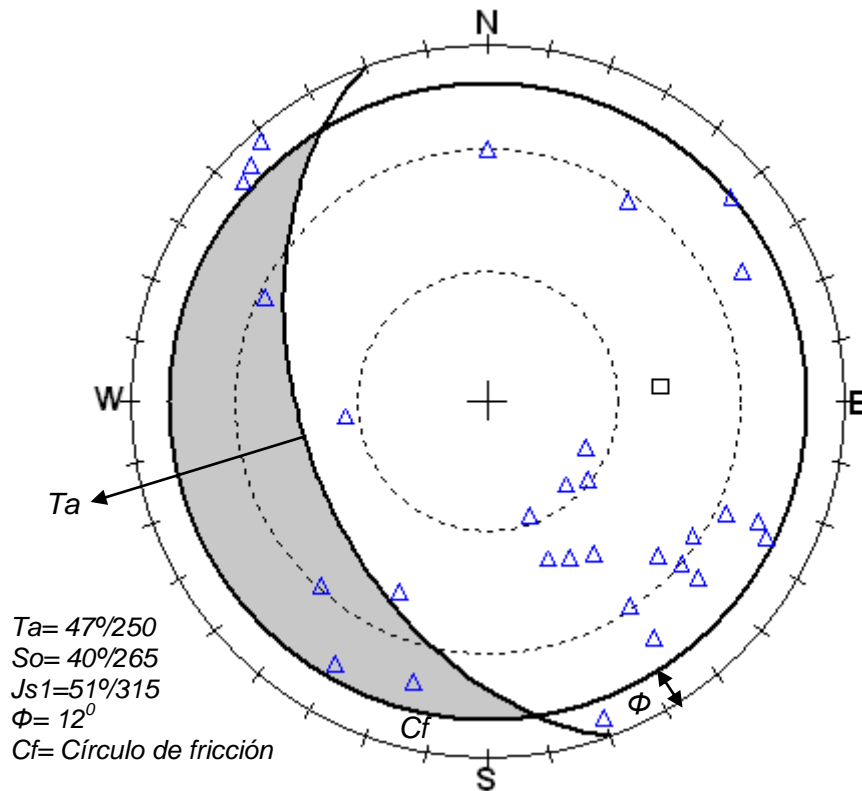
$$\alpha_f = 47^\circ/250$$

$$\psi_i = 40^\circ$$

$$\psi_f = 47^\circ$$

$$\Phi = 12^\circ$$

FIGURA 27
POLOS DE FRACTURAS Y DIRECCIÓN DEL TALUD ESTACIÓN
GEOMECÁNICA 9 (EG 9)

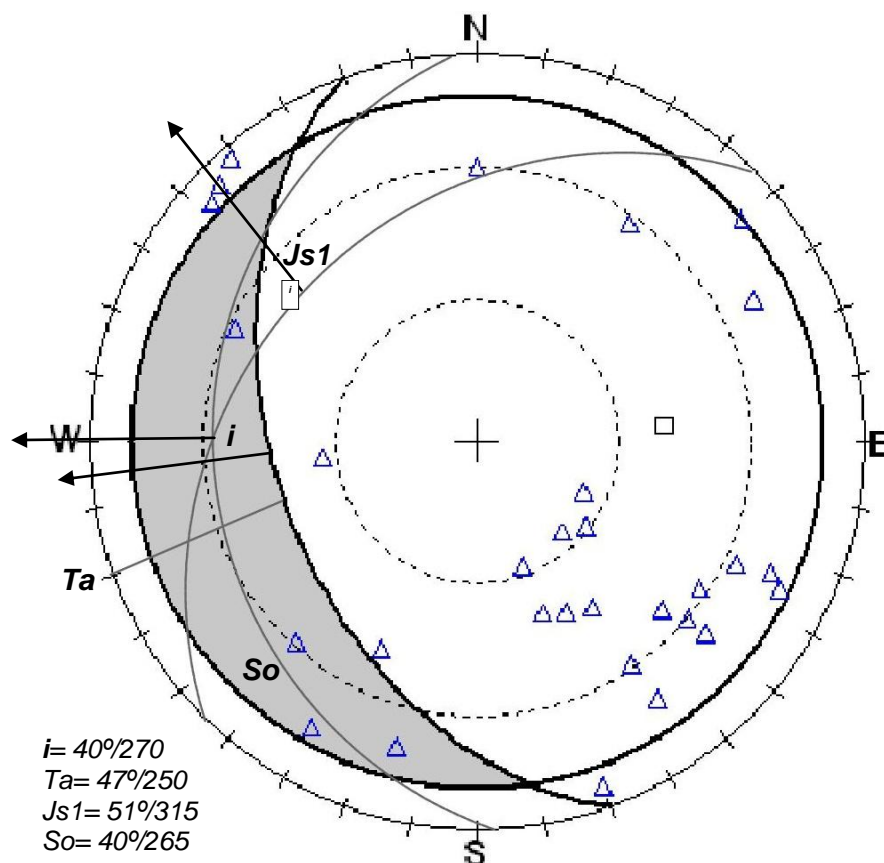


Referencia: mostrando los polos de las familias que afectan a la estación geomecánica 9, se muestra la dirección del talud así como también el círculo de fricción y el área de inestabilidad de gris.

Fuente: Investigación de campo 2 015, utilizando el *software Rockpak III*.

Para este caso, el análisis se realizó con el punto de intersección *i*, el cual cae dentro del área sombreada, por lo que sí es posible que se dé una rotura por cuña. (Figura 28)

FIGURA 28
ESTEREOGRAMA CON EL PUNTO DE INTERSECCIÓN i DE LOS
PLANOS QUE CONFORMAN LA CUÑA



Fuente: Investigación de campo 2 015, utilizando el *software Rockpak III*.

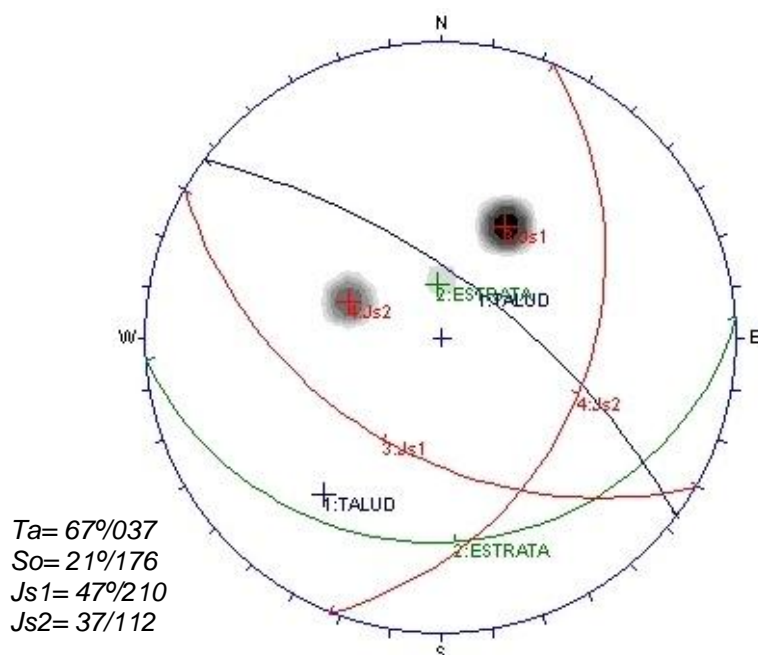
Según el *test* de *Markland's* dice que si las direcciones de los planos So y $Js1$ se encuentran entre i y Ta entonces ocurrirá el deslizamiento sobre el plano So y $Js1$ en dirección del máximo buzamiento, de lo contrario será a través de la línea de intersección de los planos i . Al observar la figura 29 no cumple con el primer anunciado por lo que el deslizamiento en este caso ocurrirá en la línea de intersección $40^\circ/270$.

En el mecanismo por vuelco (*toppling*) para determinar la posibilidad de que se desarrolle el movimiento, el polo de la discontinuidad que provoca el movimiento debe de caer dentro del

área sombreada formada, en un intervalo de $\pm 30^\circ$ en este estudio a partir de la dirección del talud.

En el mecanismo de rotura por vuelco se tomó como ejemplo la estación geomecánica 1 (EG 1), la cual corresponde a un afloramiento con una potencia aproximada de 4 m de altura por 3,2 m de ancho, compuesto por calizas con meteorización grado II con una clasificación geotécnica grado IV calidad mala, la familia de diaclasas que cumplen con las condiciones para una rotura en vuelco fueron denominadas con Js1. (Figura 29)

FIGURA 29
ESTEREOGRAMA DE LA EG 1 CON LOS MECANISMOS DE VUELCO



Fuente: *Dips*, investigación de campo. 2 015.

La representación estereográfica de la figura 29 muestra el talud con dirección $67^\circ/037$ y la familia de juntas (Js1) con dirección $47^\circ/210$ y So con $21^\circ/176$ las cuales indica la posibilidad de que ocurra un mecanismo de rotura en vuelco. Para confirmar

dicho movimiento se realizó la comprobación de los enunciados descritos en el capítulo 2 en donde se deberá de cumplir con la condición:

$$\alpha_p = (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 30^\circ$$

$$(90^\circ - \Psi_p) \leq (\Psi_f - \Phi_p)$$

$$\text{Si } \alpha_p = 47^\circ / 210$$

$$\alpha_f = 67^\circ / 037$$

$$210 = (37 \pm 180^\circ) \pm 30^\circ$$

$$\Psi_p = 47^\circ$$

$$\Psi_f = 67^\circ$$

$$\Phi_p = 24^\circ$$

$$90^\circ - 47^\circ \leq 67^\circ - 24^\circ$$

$$43^\circ \leq 43^\circ$$

Observadas las condiciones y visto que satisfacen las igualdades se puede concluir que la rotura en vuelco si es posible para este caso. En forma gráfica se realizan dos líneas que corten el centro del estereograma estableciendo un intervalo de $\pm 30^\circ$ para no descartar posibles familias de polos que puedan estar fuera de los límites de $\pm 20^\circ$, diferentes autores fijan estos límites entre los 15° - 30° . (Figura 30)

temporales el factor de seguridad está en torno a 1,3 pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores.

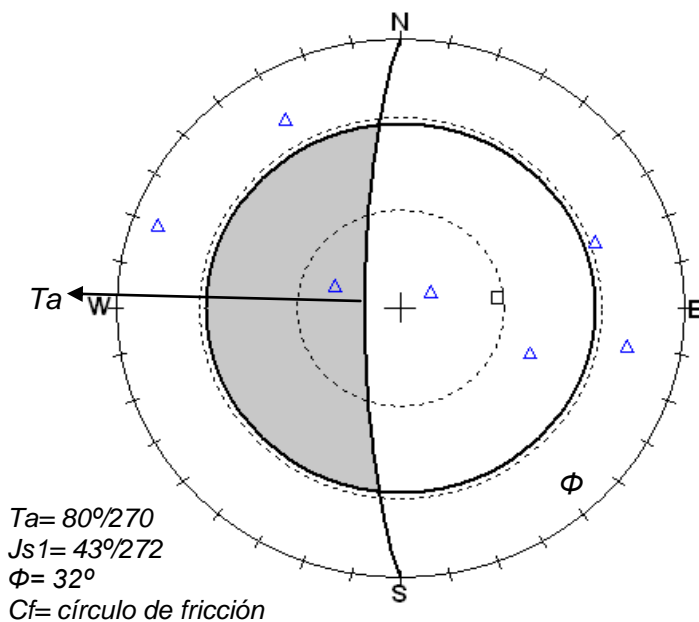
Se determinó el factor de seguridad para cada uno de los mecanismos de rotura descritos anteriormente, al usar las condiciones de $F_s > 1,3$ estable y si $F_s < 1,3$ inestable.

En el mecanismo planar se tomaron los datos de la estación geomecánica 2 (EG 2), para la determinación del factor de seguridad (F_s) se tiene la siguiente relación:

$$F = \frac{\tan \Phi}{\tan \alpha}$$

La cual involucra el ángulo de fricción entre las dos caras del material deslizante (Φ) y el buzamiento de la discontinuidad (α). Los datos obtenidos de la estación geomecánica 2 (EG 2) se observan en la figura 31.

FIGURA 31
DATOS DE LA ESTACIÓN GEOMECÁNICA 2 (EG 2)



Fuente: Investigación de campo 2 015, utilizando el *software Rockpak III*.

Con lo que el factor de seguridad (F_s) queda establecido con el valor siguiente:

$$F_s = \text{tg}\Phi / \text{tg}\alpha$$

$$F_s = \text{tg } 32^\circ / \text{tg } 43^\circ$$

$$F_s = 0,67$$

Como el factor de seguridad mínimo establecido es de 1,3 se establece que el macizo rocoso que contiene este mecanismo de rotura planar es inestable y que ocurre en el plano Js1.

Se muestra la tabla 10 con los factores de seguridad para los mecanismos de rotura planar localizados en las estaciones geomecánicas.

TABLA 10
FACTORES DE SEGURIDAD PARA EL MECANISMO PLANAR LOCALIZADOS EN LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS

EG	Talud	Planos	θ (°)	F_s
EG 2	80/270	43/272	32	0,67
EG 6	53/297	35/263	44	1,37
		62/278		0,51
EG 9	47/250	40/265	32	0,74
EG 10	68/115	75/119	34	0,18
EG 11	60/090	86/090	30	0,04
EG 12	42/110	75/112	24	0,11
EG 19	32/327	22/285	47	2,65
EG 21	37/357	33/335	50	1,83

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Para determinar el factor de seguridad se calculan los valores de Φ_i y τ_i , mediante proyecciones estereográficas. El ejemplo a utilizar corresponde a la estación geomecánica 9 (EG 9).

Visto los datos obtenidos para los ángulos de Φ_i y τ_i , (ver Anexos) se estableció el factor de seguridad (F_s) de la siguiente manera:

$$F_s = \frac{\tan \phi_i}{\tan \tau_i}$$

$$F_s = \frac{\tan 12^\circ}{\tan 40^\circ}$$

$$F_s = 0,25$$

Como el factor de seguridad mínimo establecido es de 1,3 se establece que el macizo rocoso que contiene este mecanismo de rotura en cuña es inestable.

La tabla 11 muestra los resultados de los factores de seguridad para el mecanismo de cuña encontrados en las estaciones geomecánicas, utilizando el método de Klaus John.

TABLA 11
FACTORES DE SEGURIDAD PARA EL MECANISMO DE CUÑAS
ENCONTRADOS EN LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS
UTILIZANDO LOS ÁNGULOS ϕ_i Y τ_i

Factor de seguridad con el método de Klaus John							
EG	Talud	Planos	ϕ (°)	i	Φ_i	τ_i	F_s
EG 3	67/285	76/010	30	34/290	34	44	0,70
		52/230					
EG 4	33/297	32/263	28	31/259	26	32	0,78
		50/200					
EG 9	47/250	40/265	32	38/266	12	40	0,25
		51/315					
EG 11	60/090	66/182	30	23/100	43	22	2,31
		58/023					
EG 13	37/065	59/126	30	47/072	42	48	0,81
		81/349					
EG 16	33/025	54/070	48	22/358	57	22	3,81
		75/273					
EG 19	32/327	75/233	47	67/279	50	67	0,51
		68/302					

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Con el método de Hoek y Bray que utiliza los ángulos ξ y β , cuya expresión de cálculo es $F_s = [\text{sen } \beta / \text{sen } \xi / 2] \times [\tan \Phi / \tan i]$ el factor de seguridad para la estación geomecánica 9 (EG 9) es el siguiente:

$$F_s = [\text{sen } \beta / \text{sen } \xi / 2] \times [\tan \Phi / \tan i]$$

$$F_s = [\text{sen } 60^\circ / \text{sen } 71^\circ] \times [\tan 32^\circ / \tan 38^\circ]$$

$$F_s = 0,91 \times 0,79$$

$$F_s = 0,73$$

Los resultados de los factores de seguridad con el método de Hoek y Bray para el mecanismo de cuñas se muestran en la tabla 12.

TABLA 12
FACTORES DE SEGURIDAD PARA EL MECANISMO DE CUÑAS
ENCONTRADOS EN LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS
UTILIZANDO LOS ÁNGULOS ξ Y β

Factor de seguridad con el método de Hoek y Bray utilizando ξ y β							
EG	Talud	Planos	θ (°)	i	ξ 1/2	β	F_s
EG 3	67/285	76/010	30	34/290	32	68	1,50
		52/230					
EG 4	33/297	32/263	28	31/259	68	60	0,83
		50/200					
EG 9	47/250	40/265	32	38/266	71	60	0,73
		51/315					
EG 11	60/090	66/182	30	23/100	30	76	2,64
		58/023					
EG 13	37/065	59/126	30	47/072	29	102	1,09
		81/349					
EG 16	33/025	54/070	48	22/358	28	66	5,35
		75/273					
EG 19	32/327	75/233	47	67/279	57	50	0,42
		68/302					

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Para el mecanismo de rotura en vuelco se toma los datos de la potencia de los bloques: altura (h) y ancho (a) además del ángulo de buzamiento del bloque deslizante (β). Como ejemplo se

tienen los datos de la estación geomecánica 1 (EG 1) en donde el factor de seguridad quedo así:

$$F_s = (a/h) / \operatorname{tg} \beta$$

$$F_s = (0,20/0,50) / \operatorname{tg} 47^\circ$$

$$F_s = 0,37$$

Y cumple con la condición descrita en el capítulo II la cual es la siguiente: $\beta > \Phi$ y $a/h < \operatorname{tg} \beta$; el bloque puede deslizarse y volcarse simultáneamente.

$$47^\circ > 24^\circ \text{ y } 0,40 < 1,07$$

Utilizando $F_s = \tan \Phi / \tan(\Psi + \beta - 90^\circ)$ para el mecanismo de vuelco incluyendo el ángulo de fricción del material entre planos en el talud sin excavar se tiene:

$$F_s = \tan 24^\circ / \tan (67^\circ + 47^\circ - 90^\circ)$$

$$F_s = 0,44 / 0,44$$

$$F_s = 1$$

En donde:

Ψ = inclinación del talud

β = inclinación de las capas

Φ = ángulo de fricción entre planos

En la tabla 13 se muestran los factores de seguridad utilizando ambos enunciados.

TABLA13
FACTORES DE SEGURIDAD PARA MECANISMOS DE VUELCO
PRESENTES EN LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS

EG	Talud	Plano	ϕ (°)	a (cm)	h (cm)	Fs	Fs= $\tan\phi/\tan(\psi+\beta-90)$
EG 1	67/037	47/210	24	20	50	0,37	1
EG 6	53/297	81/100	44	19	47	0,06	1
EG 10	68/115	74/310	34	45	112	0,12	0,52
EG 11	60/090	35/265	30	40	33	2,63	6,59
EG 12	42/110	42/273	24	52	41	1,41	****
		75/315				1,27	0,87
EG 13	37/065	37/270	30	56	45	1,65	****
		58/259				1,24	6,59
EG 14	25/105	42/263	32	34	21	1,80	****
		56/248				1,09	****
EG 15	25/105	42/263	52	37	25	1,64	****

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Con todos los procedimientos anteriores se obtuvieron los factores de seguridad para cada uno de los mecanismos de rotura, los cuales se presentan en general en el cuadro 19

CUADRO 19
FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS A PARTIR DE LOS
MECANISMOS DE ROTURA

EG	Familias	Dip/ Dir planos	Planar	FS	Cuña	Fs Klaus John	Fs Hoek y Bray	Vuelco	Fs=(a/h)/tanβ	Fs=tanΦ/tan(ψ+β-90)
EGM 1	So	21/176	**	**	**	**		**	**	
	Js1	47/210	**	**	**	**		inestable	0,37	1
	Js2	37/112	**	**	**	**		**	**	
EGM 2	So	80/270	**	**	**	**		**	**	
	Js1	43/272	inestable	0,67	**	**		**	**	
	Js2	70/150	***	***	***	***		***	***	
EGM 3	So	28/263	**	**	**	**		**	**	
	Js1	76/010	**	**	inestable	0,69	1,5	***	**	
	Js2	52/230	**	**				***	**	
EGM 4	So	32/263	**	**	potencial	0,78	0,83	***	**	
	Js1	50/200	**	**				***	**	
	Js2	88/250	**	**	**	**		***	**	
EGM 6	So	35/263	No posible	1,37	**	**		**	**	
	Js 1	81/100	**	**	**	**		inestable	0,06	1
	Js 2	62/278	potencial	0,51	**	**		***	**	
	Js 3	53/180	**	**	**	**		***	**	
EGM 9	So	40/265	inestable	0,74	inestable	0,25	0,73	***	**	
	Js 1	51/315	**	**				***	**	
	Js 2	83/135	**	**	**	**		**	**	
EGM 10	So	30/270	**	**	**	**		***	**	
	Js 1	75/119	potencial	0,18	**	**		**	**	
	Js 2	74/310	**	**	**	**		inestable	0,12	0,52
EGM 11	So	35/265	**	**	**	**		potencial	2,63	6,59
	Js 1	66/182	**	**	No posible	2,3	2,64	**	**	
	Js 2	86/090	potencial	0,04	**	**		**	**	
	Js 3	58/023	**	**	No posible	2,3	2,64	**	**	
EGM 12	So	42/273	**	**	**	**		**	**	
	Js 1	75/315	**	**	**	**		inestable	1,27	0,87
	Js 2	75/112	potencial	0,11	**	**		**	**	
EGM 13	So	37/270	**	**	**	**		**	**	
	Js 1	58/259	**	**	**	**		potencial	1,24	6,59
	Js 2	59/126	**	**	potencial	0,81	1,09	**	**	
Js 3	81/349	**	**	**				**		
EGM 14	So	42/263	**	**	**	**		**	**	
	Js 1	56/248	**	**	**	**		potencial	1,09	
	Js 2	72/174	**	**	**	**		**	**	
	Js 3	74/328	**	**	**	**		**	**	
EGM 15	So	42/263	**	**	**	**		no posible	1,64	
	Js 1	83/328	**	**	**	**		**	**	
	Js 2	79/148	**	**	**	**		**	**	
EGM 16	So	45/270	**	**	**	**		**	**	
	Js 1	54/070	**	**	No posible	3,81	5,35	**	**	
	Js 2	75/273	**	**				**	**	
EGM 19	So	22/285	No posible	2,65	**	**		**	**	
	Js 1	75/233	**	**	potencial	0,5	0,42	**	**	
	Js 2	68/302	**	**				**	**	
EGM 21	So	33/335	No posible	1,83	**	**		**	**	
	Js 1	73/305	**	**	**	**		**	**	
	Js 2	64/231	**	**	**	**		**	**	

Fuente: Investigación de campo 2 015.

3.2 Discusión de resultados

Se presenta el análisis y discusión de los resultados del *RMR* en base a los parámetros propuestos por el *ISRM*, el *SMR* y mecanismos de rotura los cuales fueron determinados por las condicionantes para cada tipo de rotura con su evaluación cinemática de 15 estaciones geomecánicas de estudio.

3.3 Resistencia de la matriz rocosa

Según lo mostrado en el cuadro 16 se tiene un mayor porcentaje de clasificaciones de roca tipo R_4 , perteneciente a la Unidad de Calizas, como R_3 la Unidad de Lutitas y como S_4 la Unidad de Aluvión. Como S_5 es suelo proveniente de calizas y como S_6 suelo en la unidad de lutitas. Se muestra a continuación la tabla 14.

TABLA 14
PORCENTAJE DE CLASIFICACIÓN DE ROCA EN BASE A LA
RESISTENCIA DE LA MATRIZ

CLASE	CANTIDAD	%
S_4	2	5
S_5	1	5
S_6	3	14
R_3	5	24
R_4	8	38
R_5	2	9

Fuente: Investigación de campo 2 015.

3.3.1 Clasificación *RMR* de Bieniawski

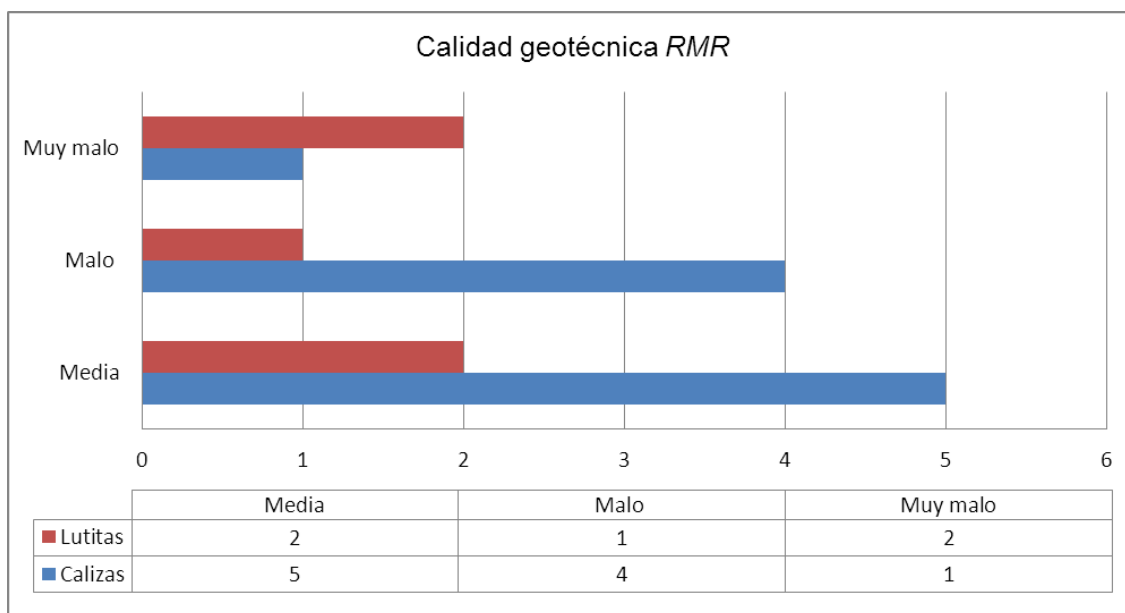
Para las 15 estaciones geomecánicas se realizó la clasificación *RMR*, siendo clasificados como macizos rocosos consistentes ya que se encuentran conformados por rocas sin presencia de suelos, son conformados principalmente por calizas y lutitas. Se logró establecer que la mayoría de macizos rocosos

se clasificaron como clase III calidad media, tanto en la Unidad de Calizas y Lutitas, clase IV calidad mala y clase V muy mala.

Estadísticamente en la Unidad de Calizas se localizaron 10 estaciones geomecánicas siendo clasificadas cinco estaciones como clase III calidad media, cuatro estaciones clase IV calidad mala y una estación clase V calidad muy mala.

En la Unidad de Lutitas se localizaron cinco estaciones geomecánicas siendo dos estaciones clase III calidad media, una estación clase IV calidad mala y dos estaciones clase V calidad muy mala. Los resultados se muestran en la figura 32.

FIGURA 32
RESULTADOS GRÁFICOS DE LA CALIDAD GEOTÉCNICA RMR

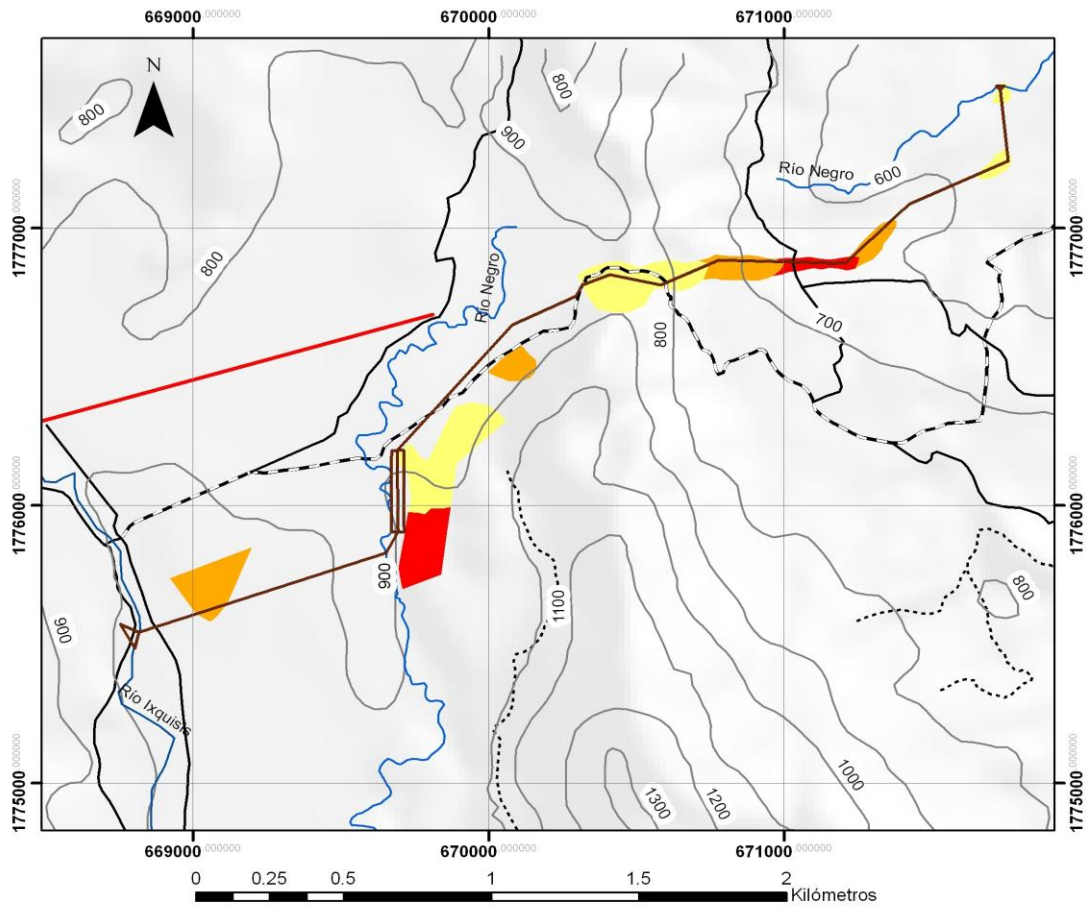


Fuente: Investigación de campo 2 015.

Como se observó en la figura 32 se tiene una mayor cantidad de estaciones geomecánicas de calidad media seguida por calidad mala hasta terminar con calidad muy mala.

El mapa 10 muestra las diferentes zonas con su respectiva calidad.

MAPA 10 ZONIFICACIÓN DE LA CALIDAD RMR



SIMBOLOGÍA

- ESTRUCTURAS POJOM
- PISTA DE ATERRIZAJE

VÍAS

TIPO

- FTN
- Terracería
- Vereda

RÍOS

Nombre

- Río Ixquisit
- Río Negro
- Río Yalhuitz

LEYENDA

CARACTERIZACIÓN RMR

RMR

- MEDIA
- MALO
- MUY MALO

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

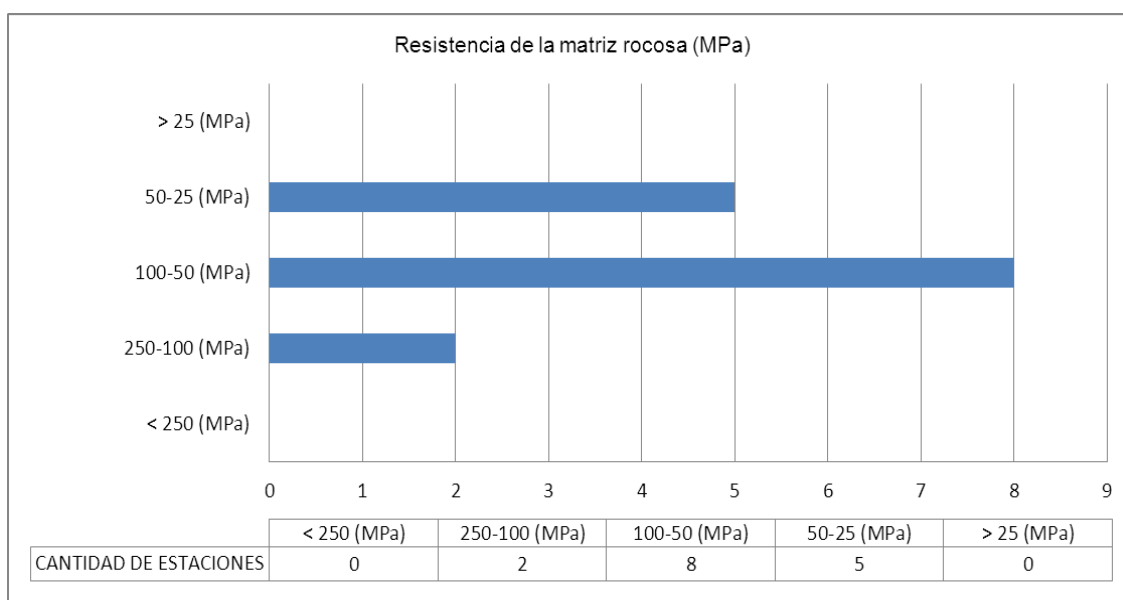
CALIDAD RMR	CLASE	PUNTUACIÓN
Media	III	60-41
Mala	IV	40-21
Muy mala	V	< 20

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Para las resistencias de la matriz rocosa se utilizó el método propuesto por el *ISRM* que consta de golpear la matriz con un martillo de geólogo y establecer el número de golpes asestados hasta lograr fragmentos o esquirlas. Se determinó que la mayoría de las estaciones geomecánicas se clasificaron en el rango de 100 MPa a 50 MPa en la Unidad de Calizas, seguidas por resistencias de 50 MPa a 25 MPa en la Unidad de Lutitas y por último se tienen resistencias entre los 250 MPa a 100 MPa en dos estaciones geomecánicas.

Se muestra en la figura 33 las cantidades de estaciones geomecánicas y su resistencia de la matriz rocosa.

FIGURA 33
CANTIDAD DE ESTACIONES GEOMECÁNICAS VRS
RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA



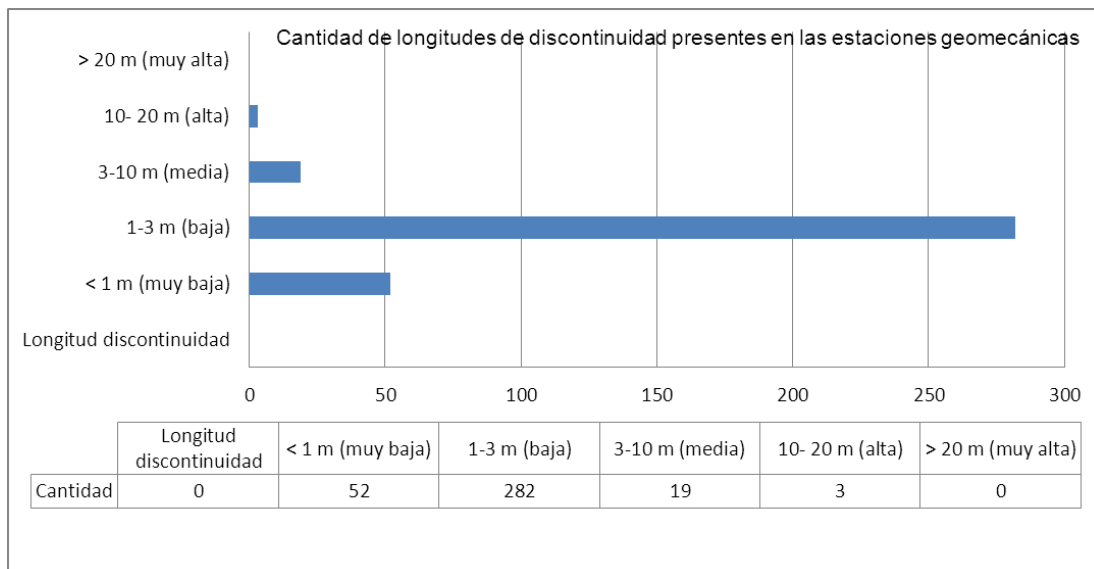
Fuente: Investigación de campo 2 015.

La mayoría de longitudes de las discontinuidades presentes en las estaciones geomecánicas se presentan como longitudes bajas las cuales se localizan en los rangos de 1 m a 3

m de longitud, así que los macizos rocosos no están afectados por fallas y por lo tanto no presentan planos de mayor debilidad. Más bien están afectados por fuerzas totalmente locales como por ejemplo el peso de los bloques que constituye al macizo rocoso.

La figura 34 se muestra la cantidad de longitudes presentes en las estaciones geomecánicas.

FIGURA 34
CANTIDAD DE LONGITUD DE DISCONTINUIDADES PRESENTES EN LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS

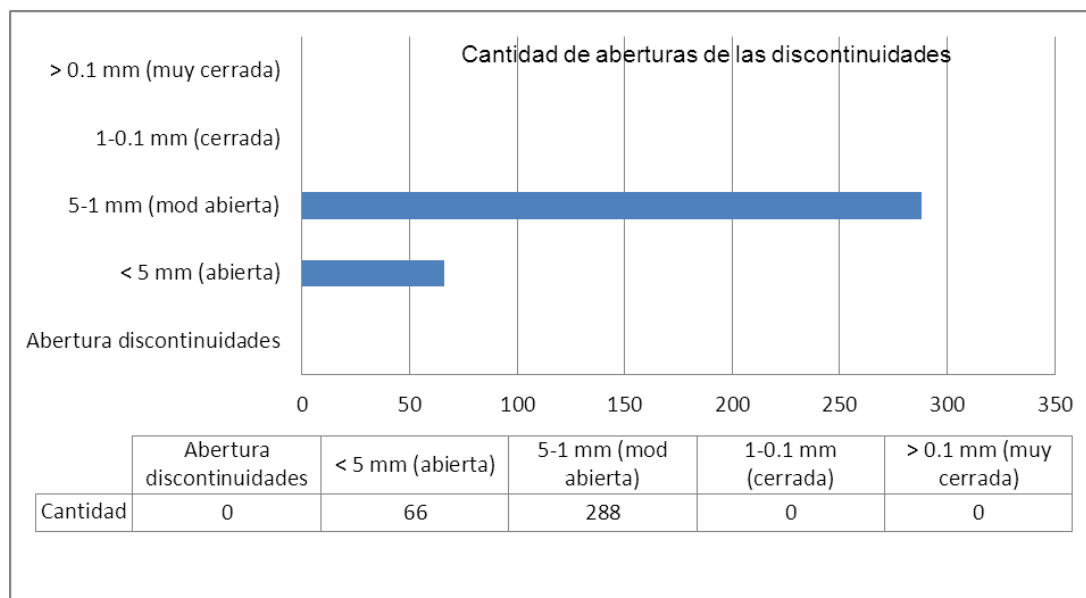


Fuente: Investigación de campo 2 015.

Las aberturas encontradas corresponden entre los rangos de 1 mm a 5 mm las cuales se catalogan como moderadamente abiertas, estas aberturas son producto de las fuerzas locales del macizo rocoso, pueden producirse por las fuerzas que ejercen el peso de los bloques. La mayoría de las veces las aberturas llegan a cerrarse a profundidad.

La figura 35 muestra la cantidad de aberturas presentes en las estaciones geomecánicas.

FIGURA 35
CANTIDAD DE ABERTURAS PRESENTES EN LAS ESTACIONES
GEOMECÁNICAS

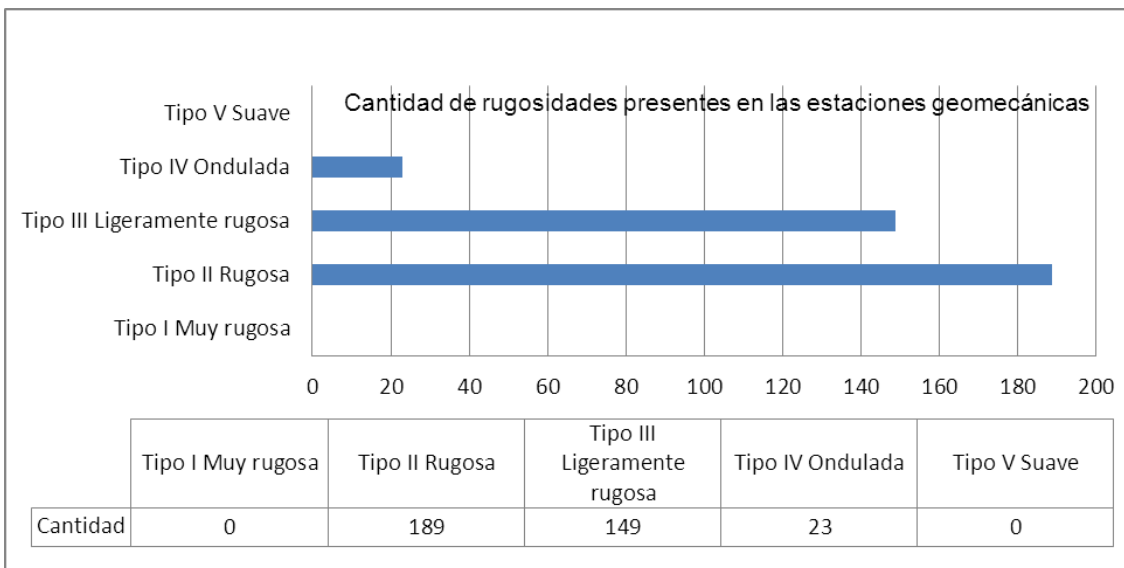


Fuente: Investigación de campo 2 015.

En su mayoría, las rugosidades que poseen las discontinuidades se clasifican como tipo II rugosas, la finalidad de clasificar las rugosidades es para evaluar la capacidad de resistencia al corte entre los planos, en donde a mayor rugosidad mayor resistencia y decrece con el aumento de la abertura y del espesor de relleno que éstas contengan. En este caso, las rugosidades indican que los planos tienen una capacidad de resistencia al corte media-alta por estar clasificadas como ligeramente rugosa-rugosa.

La figura 36 muestra la clasificación y número de rugosidades presentes en las estaciones geomecánicas.

FIGURA 36
CANTIDAD DE RUGOSIDADES PRESENTES EN LAS ESTACIONES GEOMECAÑICAS

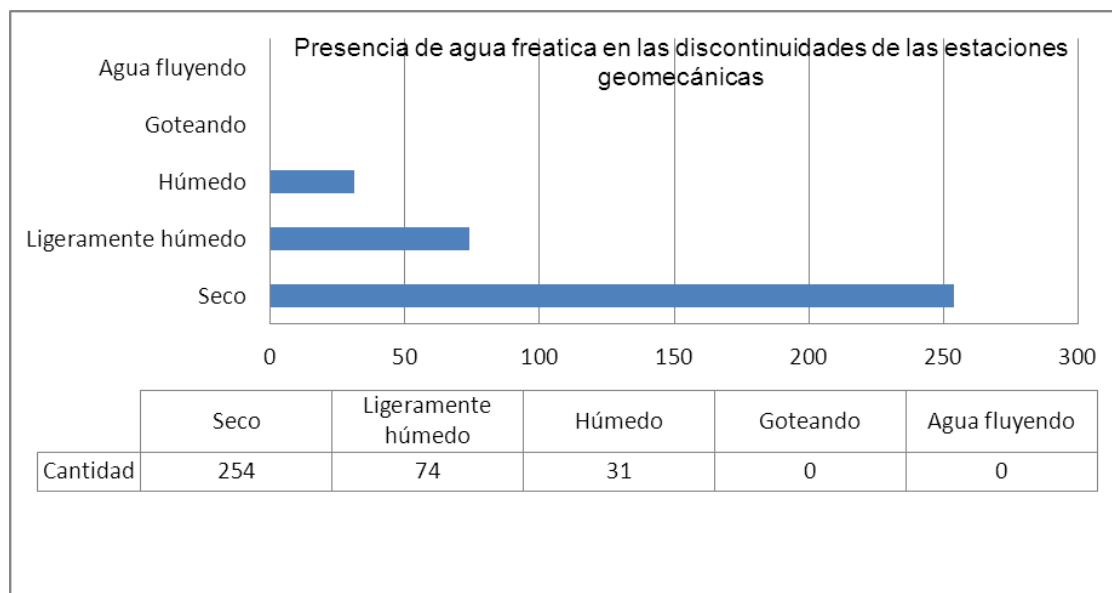


Fuente: Investigación de campo 2 015.

Con respecto a la presencia de agua freática en las discontinuidades la mayoría se clasificaron como discontinuidades secas y no parece posible que circule agua entre ellas, algunas presentaron humedad entre las discontinuidades. Además que las discontinuidades están conectadas entre sí, lo que es igual a una permeabilidad secundaria.

La figura 37 muestra la distribución de las discontinuidades que presentan indicios de agua freática.

FIGURA 37
PRESENCIA DE AGUA FREÁTICA EN LAS DISCONTINUIDADES DE LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS



Fuente: Investigación de campo 2 015.

3.3.2 Clasificación de Romana o sistema *SMR*

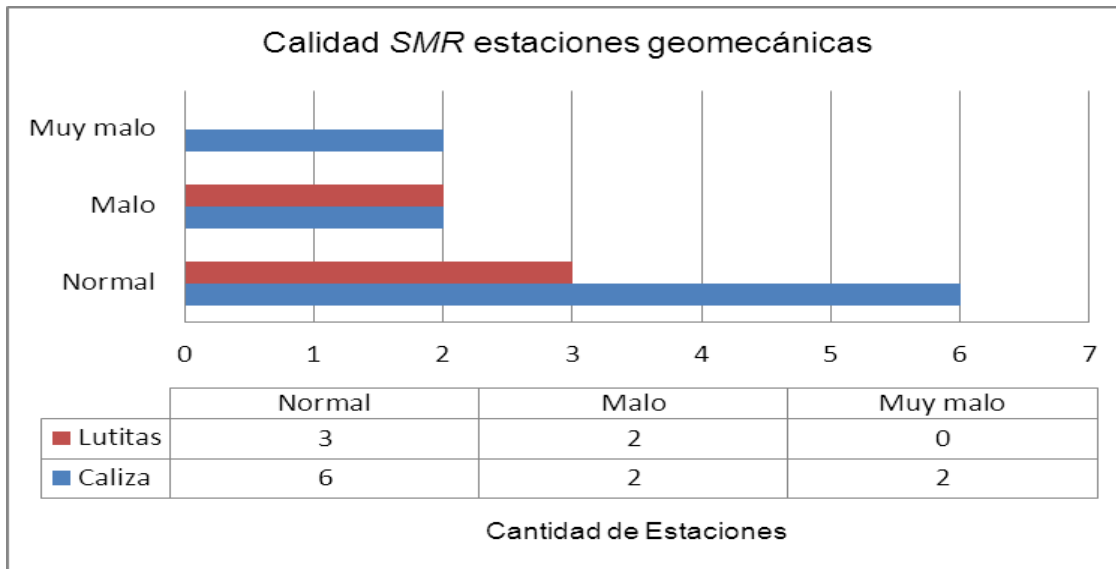
Para las 15 estaciones geomecánicas se realizó la clasificación *SMR*, se estableció que la mayoría de macizos rocosos se clasificaron como clase III calidad normal, tanto en la Unidad de Calizas y Lutitas, clase IV calidad mala en las Unidades de Caliza y Lutitas y clase V calidad muy mala en la Unidad de Calizas.

Estadísticamente en la Unidad de Calizas se localizaron diez estaciones geomecánicas, de ellas seis estaciones se clasificaron como clase III calidad normal, dos estaciones clase IV calidad mala y dos estaciones clase V calidad muy mala.

En la Unidad de Lutitas se localizaron cinco estaciones geomecánicas; tres de ellas de clase III calidad normal, y dos estaciones clase IV calidad mala.

Los resultados se muestran en la figura 38.

FIGURA 38
RESULTADOS GRÁFICOS DE LA CALIDAD GEOTÉCNICA *SMR*



Fuente: Investigación de campo 2 015.

Con estos resultados de la clasificación *SMR* se puede clasificar la estabilidad de los taludes en el trazo del canal de conducción, embalse, tubería de presión y casa de máquinas. Se obtuvo que nueve de las estaciones geomecánicas tienen sus taludes parcialmente estables, seguidas por cuatro estaciones con taludes inestables y dos estaciones totalmente inestables. La tabla 15 muestra los resultados de la clasificación *SMR*.

TABLA 15
ESTABILIDAD DE TALUDES A PARTIR DE LA CLASIFICACIÓN
SMR

Estación	Material	SMR	Descripción	Clase	Tipos de rotura	Estabilidad
EG 1	Caliza	57	Normal	III	vuelco	Parcialmente estable
EG 2	Caliza	20	Muy mala	V	planar	Totalmente inestable
EG 3	Caliza	21	Mala	IV	cuñas	Inestable
EG 4	Caliza	14	Muy mala	V	cuñas	Totalmente inestable
EG 6	Caliza	42	Normal	III	planar, vuelco	Parcialmente estable
EG 9	Caliza	24	Mala	IV	planar, cuñas	Inestable
EG 10	Caliza	59	Normal	III	planar, vuelco	Parcialmente estable
EG 11	Caliza	54	Normal	III	planar, cuñas	Parcialmente estable
EG 12	Caliza	57	Normal	III	planar, vuelco	Parcialmente estable
EG 13	Caliza	54	Normal	III	cuñas, vuelco	Parcialmente estable
EG 14	Lutitas	43	Normal	III	vuelco	Parcialmente estable
EG 15	Lutitas	43	Normal	III	vuelco	Parcialmente estable
EG 16	Lutitas	40	Mala	IV	cuñas	Inestable
EG 19	Lutitas	46	Normal	III	planar, cuñas	Parcialmente estable
EG 21	Lutitas	33	Mala	IV	planar, cuñas	Inestable

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Además de la obtención de la estabilidad de los taludes a partir del *SMR*, permite conocer los posibles métodos correctivos que pueden aplicarse para aumentar la estabilidad de los mismos. La tabla 16 muestra los tratamientos correctivos.

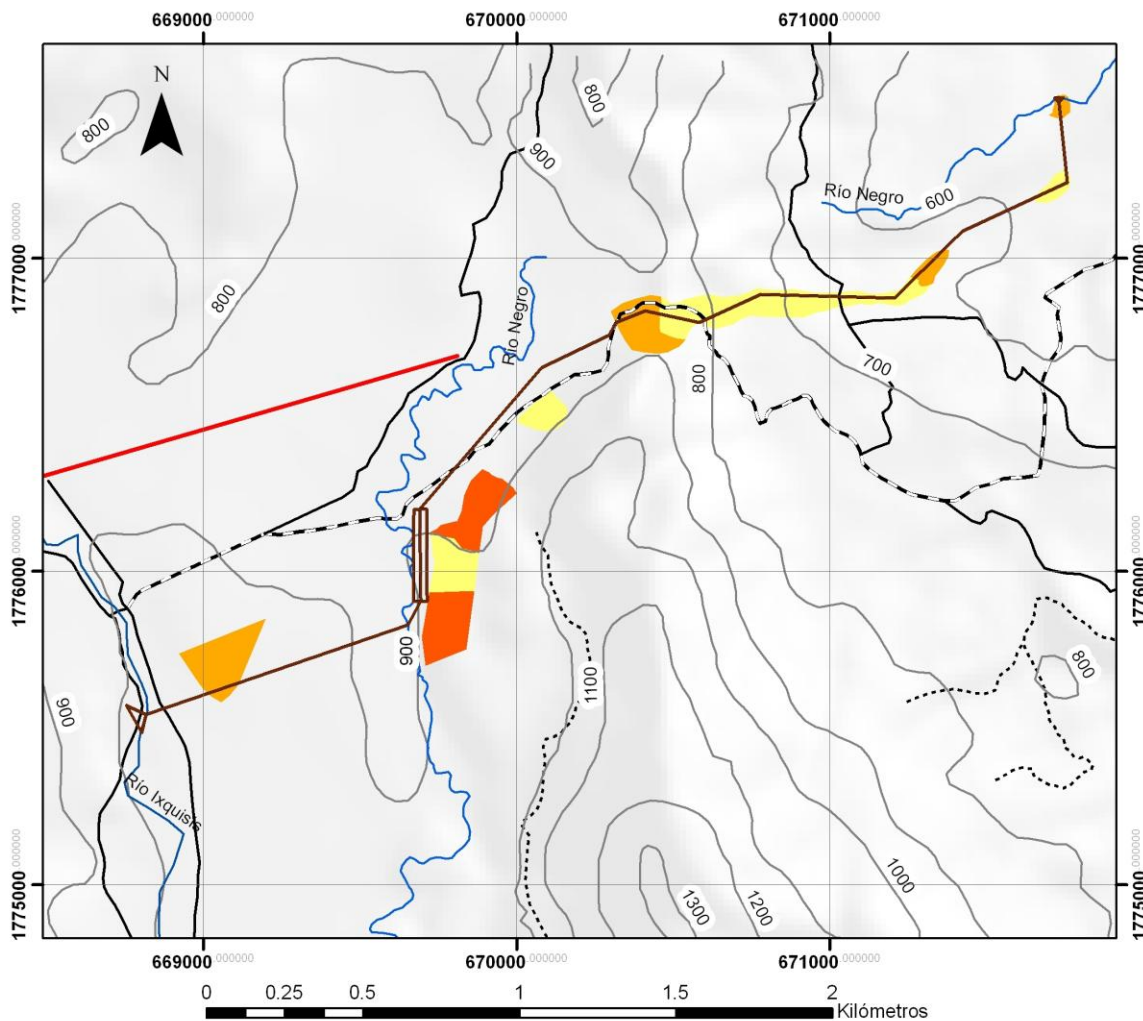
TABLA 16
MÉTODOS CORRECTIVOS PARA AUMENTO DE ESTABILIDAD
DE TALUDES A PARTIR DE VALORES DEL *SMR*

Métodos correctivos para valores obtenidos a partir del <i>SMR</i> para aumentar la estabilidad en taludes																
<i>SMR</i>	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
Reexcavacion		Reexcavación, muros de contencion														
Drenaje		Drenaje superficial, drenaje profundo														
Concreto							Concreto (gunita, hormigón de relleno, contrafuertes y/o vigas, muros de pies)									
Reforzamiento							Refuerzos (bulones, anclajes, pernos, <i>nails</i>)									
Proteccion							Protección (zanjas de pie, vallas de pie de talud, redes sobre la superficie del talud)									
Sin soporte												Scaling, trimming, ninguno				

Fuente: *Comprehensive Rock Enginnering: principles, practices and projects. A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating.* M. R. Romana 1 993.

El mapa 11 muestra las clasificaciones *SMR* con su respectiva calidad.

MAPA 11 MAPA DE CLASIFICACIÓN SMR



SIMBOLOGÍA

- ESTRUCTURAS POJOM
- PISTA DE ATERRIZAJE

VÍAS

TIPO

- FTN
- Terracería
- Vereda

RÍOS

Nombre

- Río Ixquisis
- Río Negro
- Río Yalhuitz

LEYENDA

CARACTERIZACIÓN SMR

- SMR**
- NORMAL
 - MALA
 - MUY MALA

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD SMR		
CALIDAD SMR	CLASE	PUNTUACIÓN
NORMAL	III	41-60
MALA	IV	21-40
MUY MALA	V	< 21

Fuente: Investigación de campo 2 015.

3.3.3 Mecanismos de rotura y factor de seguridad

Para la determinación de los mecanismos de rotura se utilizó la metodología descrita en el capítulo 2 se comprobaron además los enunciados que deben cumplir los mecanismos de rotura planar, cuña y vuelco.

Para los mecanismos planares los resultados de la comprobación de los enunciados se presentan en la tabla 17.

TABLA 17
COMPROBACIÓN DE ENUNCIADOS PARA EL MECANISMO DE ROTURA PLANAR

Condiciones para rotura planar												Condiciones para provocar la rotura			
EG	Plano	Talud	Ap	At	ψ_i	ψ_p	\varnothing	$\psi_i > \psi_p$	$\psi_p > \varnothing$	$Ap = At \pm 20^\circ$	Condición	Dirección del talud	ψ_p	ψ_i	Rotura
EG 2	43/272	80/270	272	270	80	43	32	80>43	43>32	272=270±20	cumple				
EG 6	35/263	53/297	263	297	53	35	44	53>35	35<44	263±297±20	No cumple	243≥263≤283	$\psi_p > 44$		no posible
	62/278		278	297	53	62	44	53<62	62>44	278=297±20	No cumple				$\psi_i > 62$
EG 9	40/265	47/250	265	250	47	40	32	47>40	40>32	265=250±20	cumple				
EG 10	75/119	68/115	119	115	68	75	34	68<75	75>34	119=115±20	No cumple			$\psi_i > 75$	potencial
EG 11	86/090	60/090	90	90	60	86	30	60<86	86>30	90=90±20	No cumple			$\psi_i > 86$	potencial
EG 12	75/112	42/110	112	110	42	75	24	42<75	75>24	112=110±20	No cumple			$\psi_i > 75$	potencial
EG 19	22/285	32/327	285	327	32	22	47	32>22	22<47	285±327±20	No cumple	265≥285≤305	$\psi_p > 47$		no posible
EG 21	33/335	37/357	335	357	37	33	50	37>33	33<50	335±357±20	No cumple	215≥335≤355	$\psi_p > 50$		no posible

Fuente: Investigación de campo 2 015.

En las condiciones se observan que solamente dos estaciones geomecánicas cumplen con los enunciados para que ocurra una rotura planar, las estaciones 6, 10, 11 y 12 tienen planos potenciales, estos cumplirán con las condiciones cuando el talud excedida a los grados expuestos en la tabla 17.

Los mecanismos de rotura en cuña que cumplen con los enunciados son mostrados en la tabla 18.

TABLA 18
COMPROBACIÓN DE ENUNCIADOS PARA EL MECANISMO DE
ROTURA EN CUÑA

EG	Talud	Condiciones para rotura en cuña									Condición	Condiciones para provocar la rotura			
		i	ai	af	ψ_i	ψ_f	ϕ	$\psi_i < \psi_f$	$\psi_i > \phi$	$\alpha_i = \pm \alpha_f$ (afore hacia el talud) ± 20		Dirección del talud	ψ_i	ψ_f	Rotura
EG 3	67/285	34/290	290	285	34	67	30	34<67	34>30	290 = \pm 285	Cumple				
EG 4	33/297	31/259	259	297	31	33	28	31<33	33>28	259 \neq \pm 297	No cumple	239 \geq 259 \leq 279			potencial
EG 9	47/250	40/270	270	250	40	47	32	40<47	40>32	270 = \pm 250	Cumple				
EG 11	60/090	23/100	100	90	23	60	30	23<60	23<30	100 = \pm 90	No cumple		$\psi_i > 30$		no posible
EG 13	37/065	47/072	72	65	47	37	30	47>37	47>30	72 = \pm 65	No cumple			$\psi_i > 47$	potencial
EG 16	33/025	22/358	358	25	22	33	48	22<33	33<48	358 \neq \pm 25	No cumple	338 \geq 358 \leq 018	$\psi_i > 48$		no posible
EG 19	32/327	67/279	279	327	67	32	47	67>32	67>47	279 \neq \pm 327	No cumple	259 \geq 279 \leq 299		$\psi_i > 67$	potencial

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Las estaciones geomecánicas que cumplen con los enunciados son la 3 y la 9, la estación 13 solo necesita que el talud sobrepase los 47° grados de inclinación y las estaciones 4 y 19 cumplirán si la dirección del talud es modificado y si también sobrepasan la inclinación del talud en los grados mostrados en la tabla 18.

Para las roturas en vuelco las estaciones que cumplen con las condiciones se presentan en la tabla 19.

TABLA 19
COMPROBACIÓN DE ENUNCIADOS PARA EL MECANISMO DE
ROTURA EN VUELCO

Condiciones para rotura en vuelco											Condiciones para provocar la rotura			
EG	Plano	Talud	α_p	α_f	Ψ_p	Ψ_f	Φ_p	$(90^\circ - \Psi_p) \leq (\Psi_f - \Phi_p)$	$\alpha_p = (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 30^\circ$	Condición	Dirección del talud	Ψ_i	Ψ_f	Rotura
EG 1	47/210	67/037	210	37	47	67	24	$90-47 \leq 67-24= 43 \leq 43$	$210 = (37 \pm 180) \pm 30$	Cumple				
EG 6	81/100	53/297	100	297	81	53	44	$90-81 \leq 53-44= 9 \leq 9$	$100 = (297 \pm 180) \pm 30$	Cumple				
EG 10	74/310	68/115	310	115	74	68	34	$90-74 \leq 68-34= 16 \leq 34$	$310 = (115 \pm 180) \pm 30$	Cumple				
EG 11	35/265	60/090	265	90	35	60	30	$90-35 \leq 60-30= 55 \leq 30$	$265 = (90 \pm 180) \pm 30$	No cumple			$\Psi_f > 85$	potencial
EG 12	75/315	42/110	315	110	75	42	24	$90-75 \leq 42-24= 15 \leq 18$	$315 = (110 \pm 180) \pm 30$	Cumple				
EG 13	58/259	37/065	259	65	58	37	30	$90-58 \leq 37-30= 32 \geq 7$	$259 = (65 \pm 180) \pm 30$	No cumple			$\Psi_f > 62$	potencial
EG 14	56/248	25/105	248	105	56	25	32	$90-56 \leq 25-32= 34 \geq 7$	$248 = (105 \pm 180) \pm 30$	No cumple			$\Psi_f > 66$	potencial
EG 15	42/263	25/105	263	105	42	25	52	$90-42 \leq 25-52= 48 \geq 27$	$263 = (105 \pm 180) \pm 30$	No cumple				no posible

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Para el mecanismo de rotura en vuelco cuatro estaciones cumplen con las condiciones, estas son: 1, 6, 10, y 12; las estaciones 11, 13 y 14 cumplirán si los taludes son modificados en su inclinación y sobrepasen los grados mostrados en la tabla 19.

Con la condición cinemática propuesta por Goodman y Bray la cual es $\alpha + \beta + (90 - \Phi) \geq 180$ los resultados para la comprobación se muestran en la tabla 20.

TABLA 20
COMPROBACIÓN CINEMÁTICA DE GOODMAN Y BRAY PARA
EL MECANISMO DE ROTURA EN VUELCO

Condiciones de rotura en vuelco por Goodman y Bray							
EG	Plano	Talud	α	β	Φ	$\alpha + \beta + (90 - \Phi) \geq 180$	Condición
EG 1	47/210	67/037	47	67	24	$47+67+(90-24) \geq 180$	cumple
EG 6	81/100	53/297	81	53	44	$81+53+(90-44) \geq 180$	cumple
EG 10	74/310	68/115	74	68	34	$74+68+(90-34) \geq 180$	cumple
EG 11	35/265	60/090	35	60	30	$35+60+(90-30) \geq 180$	no cumple
EG 12	75/315	42/110	75	42	24	$75+42+(90-24) \geq 180$	cumple
EG 13	58/259	37/065	58	37	30	$58+37+(90-30) \geq 180$	no cumple
EG 14	56/248	25/105	56	25	32	$56+25+(90-32) \geq 180$	no cumple
EG 15	42/263	25/105	42	25	52	$42+25+(90-52) \geq 180$	no cumple

Fuente: Investigación de campo 2 015.

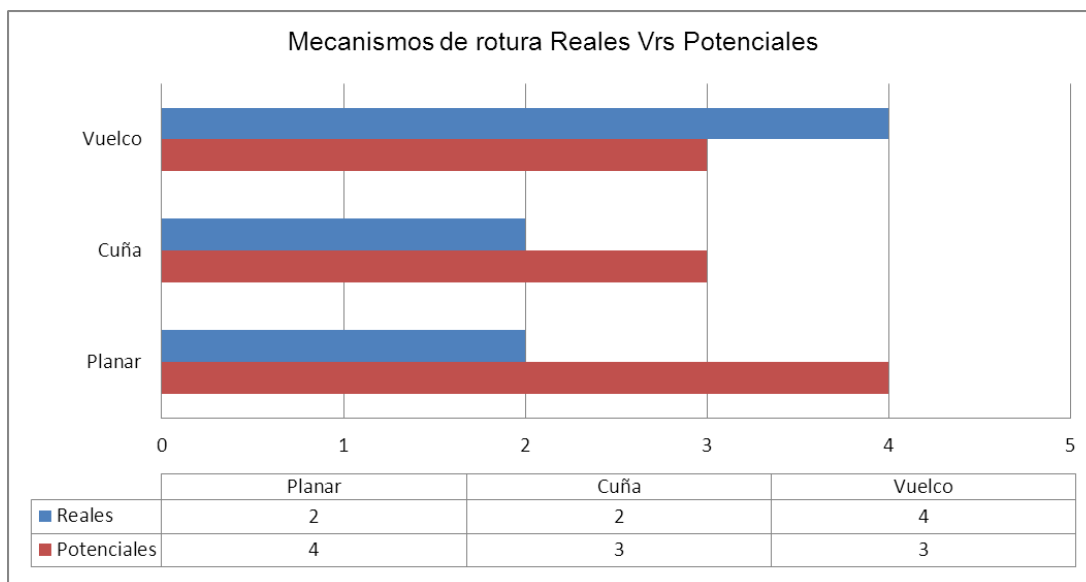
Como se puede observar la comprobación cinemática de Goodman refleja los mismos resultados que las comprobaciones realizadas con estereofalsillas.

Se estableció por medio de las comprobaciones anteriores que en el área existe una igualdad de rotura planares y cuñas cuantificadas con dos respectivamente, también hay una cantidad mayor de roturas por vuelco.

También existen las roturas potenciales planares, cuñas y vuelco, aunque estos no cumplen con los enunciados, debido a la dirección y buzamiento del talud original.

La figura 39 muestra los resultados de los mecanismos de rotura reales y de los mecanismos de rotura con posibles movimientos no perteneciente a los tres casos aquí analizados

FIGURA 39
RESULTADOS GRÁFICOS DE CANTIDADES DE MECANISMOS
CON POSIBILIDAD DE FALLA



Fuente: Investigación de campo 2 015.

La tabla 21 muestra las estaciones geomecánicas que presentan mecanismos de rotura potenciales.

TABLA 21
MECANISMOS CON POSIBILIDAD DE FALLA

EG	Material	RMR	SMR	Planar	Cuña	Vuelco
				Plano	Plano	Plano
EG 1	Caliza	37	57	***	***	47/210
EG 2	Caliza	11	20	43/272	***	***
EG 3	Caliza	52	21	***	76/010	***
					52/230	
EG 4	Caliza	52	14	***	32/263	***
					50/200	
EG 6	Caliza	29	42	62/278	***	81/100
EG 9	Caliza	49	24	40/265	40/265	***
					51/315	
EG 10	Caliza	57	59	75/119	***	74/310
EG 11	Caliza	49	54	86/090	***	35/265
EG 12	Caliza	32	57	75/112	***	75/315
EG 13	Caliza	34	54	***	59/126	58/259
					81/349	
EG 14	Lutitas	18	43	***	***	56/248
EG 19	Lutitas	42	46	***	75/233	***
					68/302	

Fuente: Investigación de campo 2 015.

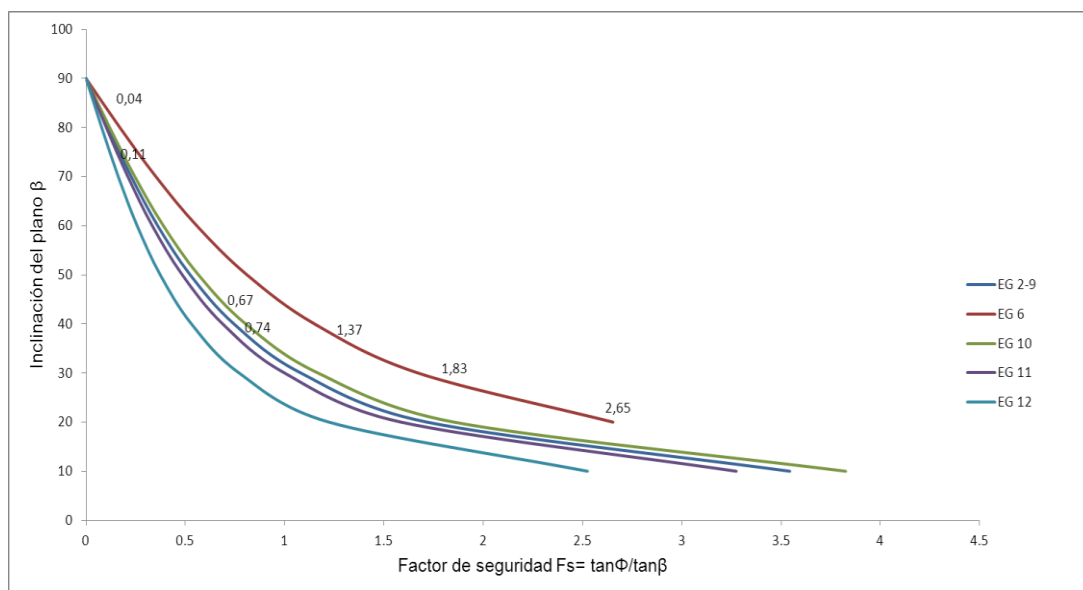
Junto al análisis de ocurrencia de los mecanismos de rotura se realizó también el análisis del factor de seguridad (Fs) que tienen los taludes en el área. Si el factor de seguridad es menor que 1,3 el mecanismo de rotura es inestable, y si es mayor a 1,3 se considera como estable.

En el cálculo del factor de seguridad del mecanismo de rotura planar se utilizó la expresión $F_s = \tan \Phi / \tan \beta$, en donde se considera que el talud se encuentra sin presencia de agua y sin grietas de tracción y la cohesión es nula o = 0.

Los factores de seguridad calculados para los mecanismos planares localizados en el área están en la tabla 10.

Las curvas de variación del factor de seguridad para los mecanismos de rotura planar en función de la inclinación del plano β como se muestra en la figura 40. Se observa que el factor de seguridad aumenta hacia la derecha cuando la inclinación del plano β disminuye, es decir que tendremos un factor de seguridad igual o mayor a 1 cuando el buzamiento del mecanismo planar sea igual o menor al ángulo de fricción interna del material litológico a analizar.

FIGURA 40
FACTORES DE SEGURIDAD PARA LOS MECANISMOS DE ROTURA PLANAR



Fuente: Investigación de campo 2 015.

El caso de falla en cuña es simple de analizar, es el caso en que se asume que sólo existe fricción para los dos planos de cuña y que el ángulo de fricción es el mismo para ambos planos.

De esta manera el factor de seguridad queda expresado de la siguiente manera.

$$F_s = [\text{sen } \beta / \text{sen } \xi/2] \times [\tan \Phi / \tan i]$$

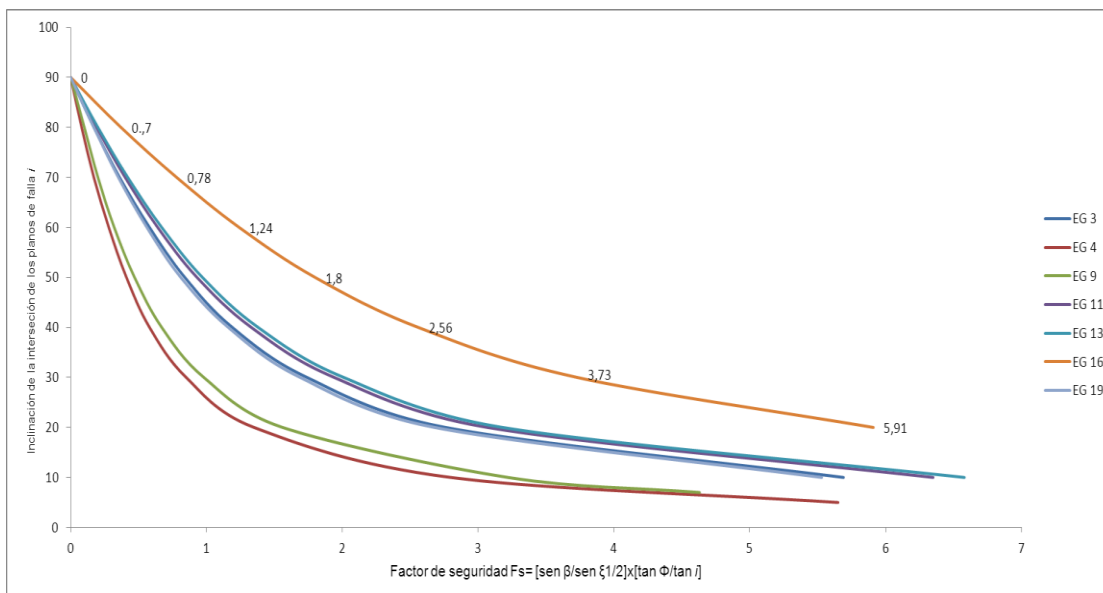
En donde $\xi/2$ es el ángulo de abertura de la cuña y β el ángulo de la directriz de la cuña con la horizontal. Se utilizó la metodología de Hoek y Bray ya que contempla el ángulo de fricción entre los planos siendo de mayor certeza al calcular el factor de seguridad.

Los factores de seguridad calculados para el mecanismo de rotura en cuñas se localizan en la tabla 12.

Las curvas de variación del factor de seguridad para los mecanismos de rotura en cuñas están función de la inclinación del plano de falla i , se observan en la figura 41. El factor de seguridad aumenta hacia la derecha cuando la inclinación del plano i disminuye, es decir que tendremos un factor de seguridad mayor a 1 cuando el ángulo β sea mayor que el ángulo $\xi/2$.

La figura 41 muestra las curvas de la variación del factor de seguridad con respecto a la inclinación de la cuña de falla (i).

FIGURA 41
VARIACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON RESPECTO A
LA INCLINACIÓN DE LA CUÑA



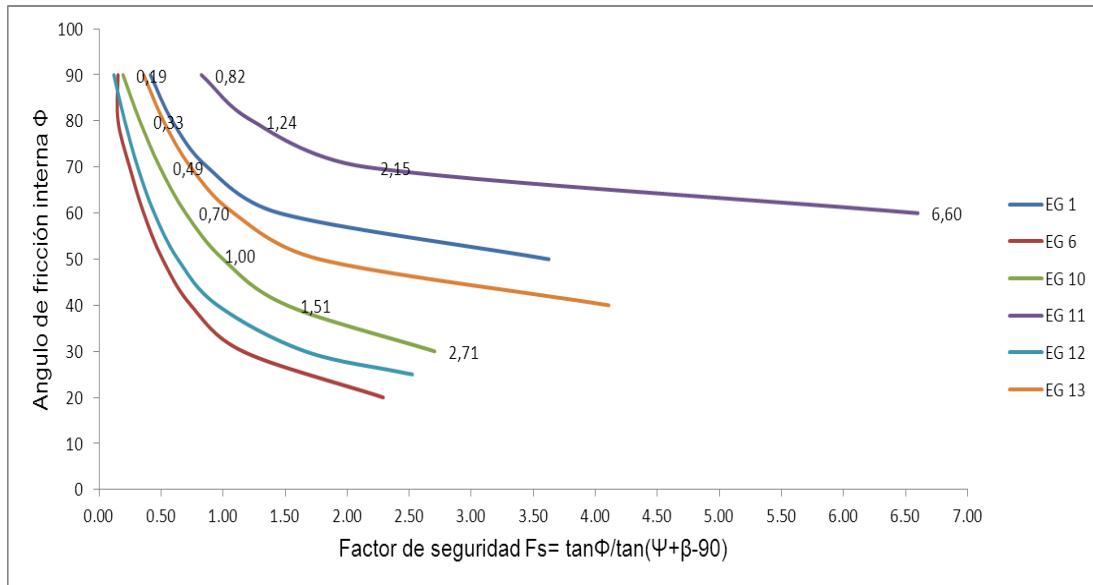
Fuente: Investigación de campo 2 015.

En el mecanismo de vuelco el factor de seguridad se calculó con la expresión $F_s = \tan \Phi / \tan(\Psi + \beta - 90)$ en donde β es la inclinación del plano que contiene al mecanismo de falla. Esto debido a que la expresión cumple con los criterios de análisis cinemático de Goodman y Bray.

Las curvas de variación del factor de seguridad para los mecanismos de rotura en vuelco están función del ángulo de fricción interna y de la relación propuesta por Goodman y Bray.

Si el ángulo de fricción interna es mayor o igual a la $\tan(\Psi + \beta - 90)$ el factor de seguridad será mayor o igual a 1. El factor de seguridad aumenta cuando el ángulo de fricción interna del material disminuye. La figura 42 muestra las variaciones del factor de seguridad con respecto al ángulo de fricción interna.

FIGURA 42
CURVAS DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA EL MECANISMO DE ROTURA EN VUELCO



Fuente: Investigación de campo 2 015.

3.4 Mecanismos de protección y sostenimiento

En este apartado se mencionarán algunos mecanismos de estabilización y corrección de taludes, para su establecimiento se deben considerar otros factores como los geomorfológicos (topografía, distribución de las discontinuidades y estratificaciones), internos (propiedades mecánicas, estado de esfuerzos actuantes) e hidrogeológicos (agua superficial y subterránea).

El estudio mostró la existencia mecanismos de rotura planar, cuña y vuelco, donde las siguientes medidas de protección y sostenimiento son consideradas como factibles.

3.4.1 Minimizar las caídas de rocas

La caída de roca se produce cuando por razones diversas, el macizo rocoso colapsa o falla, lo que genera una inestabilidad y por acción de la gravedad esta masa se desliza en forma

repentina debido a situaciones del tipo: gravitatorio (desprendimiento y/o desplazamiento), Violentas o Explosivas (*Rock Burst*).

Entre los métodos más comunes se encuentra la colocación de mallas ancladas que son de alambre galvanizado, ancladas con pernos para evitar la ocurrencia de desprendimientos de bloques de rocas, (Fotografía 7).

FOTOGRAFÍA 7 COLOCACIÓN DE ENMALLADO PARA EVITAR CAÍDAS DE ROCAS



Autor: http://www.teurcontratistas.com/static.img/proyectos_img/537ce0cf188d0.jpg
(septiembre 13 del 2 015).

En el caso que la roca se encuentre muy fracturada y con meteorización avanzada, resulta inadecuada la colocación de los anclajes o pernos para el sostenimiento del mallado.

Debe tenerse en cuenta que los anclajes de mallas protegen de la caída de bloques superficiales, pero no

representan estabilidad para el caso de fallas de bloques grandes o movimientos de grandes masas de roca-suelo.

Las estaciones geomecánicas que pueden presentar este tipo de problema en el proyecto pueden ser las siguientes, tomando en consideración los resultado del *RMR* (Tabla 22).

TABLA 22
ESTACIONES GEOMECÁNICAS A LAS CUALES SE PUEDE APLICAR UN SOSTENIMIENTO CONTRA CAÍDAS DE ROCAS

Estación	Coordenadas		Material	Talud		<i>RMR</i>	Calidad Geotécnica
	X	Y		<i>Dir</i>	<i>Dip</i>		
EG 4	669886	1776173	Caliza	<i>N27E</i>	33° <i>NW</i>	52	Media
EG 9	670350	1776696	Caliza	<i>N20W</i>	47° <i>SW</i>	49	Media
EG 10	670505	1776702	Caliza	<i>N25E</i>	68° <i>SW</i>	57	Media
EG 11	670634	1776707	Caliza	<i>N-S</i>	60° <i>E</i>	49	Media
EG 19	671700	1777105	Lutitas	<i>N57E</i>	32° <i>NW</i>	42	Media
EG 21	671737	1777367	Lutitas	<i>N87E</i>	37° <i>NW</i>	42	Media

Fuente: Investigación de campo 2 015.

a. Cercas para contención de rocas muros de concreto y diques

En el caso en que los enmallados fallen o bien no sea posible la colocación de los mismos porque las condiciones de la roca no lo permite, se puede optar por las cercas de contención las cuales son mallas metálicas atadas a perfiles metálicos empotrados en el macizo rocoso, para esto se deberán realizar los cálculos para establecer la profundidad a la cual deberán de ser asentados. También se puede optar por la colocación de diques y gaviones (Fotografía 8).

FOTOGRAFÍA 8 ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN PARA CAÍDAS DE ROCAS



a) malla metálica b) diques c) gaviones.

Autor: <http://www.tecnologiaminera.com/tm/biblioteca/articulo.php?id=204> (septiembre 21 del 2015).

b. *Scaling y trimming*

Se refieren en general a tareas de limpieza y remoción en la superficie del talud. El objetivo de estas tareas es la de incrementar la seguridad, frente a problemas de caídos. El *scaling* es básicamente la remoción de rocas sueltas o inestables y escombros existentes en una superficie de corte de un talud. Se puede realizar a mano, uso de barretas de acero, gatos hidráulicos o neumáticos. En cuanto al *trimming* es el proceso en el que se eliminan las salientes de roca suelta e inestable de la superficie del talud; para ello se utilizan medios mecánicos de percusión y/o de explosivos, (Fotografía 9).

FOTOGRAFÍA 9 SCALING Y TRIMMING EN TALUDES ROCOSOS



a) *scaling* b) *trimming*

Autor: <http://www.ameritech.pro/rock-scaling> (septiembre 21 del 2 015).

c. Hormigón proyectado

Minimiza el desprendimiento de bloques y el deterioro de la superficie del macizo rocoso, actúa como una membrana soportada por la resistencia a la tensión y al cortante del mortero, la membrana no actúa por si sola como estructura de contención y no hay transferencias de cargas de la masa de roca a la membrana de concreto. (Fotografía 10)

Se denomina concreto proyectado al mortero colocado por bombeo a presión con agregados con dimensiones de 20 mm de diámetro; cuando el mortero utiliza partículas de menor tamaño se le denomina gunita, la cual se aplica en capas de 8 cm a 10 cm de espesor.

FOTOGRAFÍA 10 RECUBRIMIENTO DEL TALUD CON HORMIGÓN PROYECTADO (SHOTCRETE)



Autor: http://www.teurcontratistas.com/static.img/proyectos_img/537cd1c7579f4.jpg
(septiembre 21 del 2 015).

3.4.2 Aumentar la seguridad del talud

a. Minimizar o anular la entrada de agua de escorrentía al talud

Una de las técnicas más efectivas para la estabilización de taludes es el control de las aguas superficiales y subterráneas; su objetivo es controlar el agua y sus efectos, disminuyen así las fuerzas que producen el movimiento.

Las zanjas en la corona o parte alta de un talud son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas de lluvias, evitan así su paso por el talud.

La zanja de coronación no debe construirse muy cerca al borde superior del talud, para evitar que se conviertan en el comienzo y guía de un deslizamiento en cortes recientes o de una nueva superficie de falla (movimiento regresivo) en deslizamientos ya producidos; o se produzca la falla de la corona del talud o escarpe.

Se recomienda que las zanjas de coronación sean totalmente impermeabilizadas y proveer una suficiente pendiente para garantizar un rápido drenaje del agua captada. Sin embargo se nota que, a pesar de lograrse originalmente una impermeabilización, con el tiempo se producen movimientos en el terreno que causan grietas en el impermeabilizante y por lo tanto infiltraciones que conllevan a una disminución de la resistencia del suelo y por ende a su falla.

b. Corrección del talud

Al disminuir la pendiente del talud, el círculo crítico de falla se hace más largo y más profundo para el caso de un talud estable, aumentándose en esta forma el factor de seguridad. El abatimiento se puede lograr por corte o por relleno.

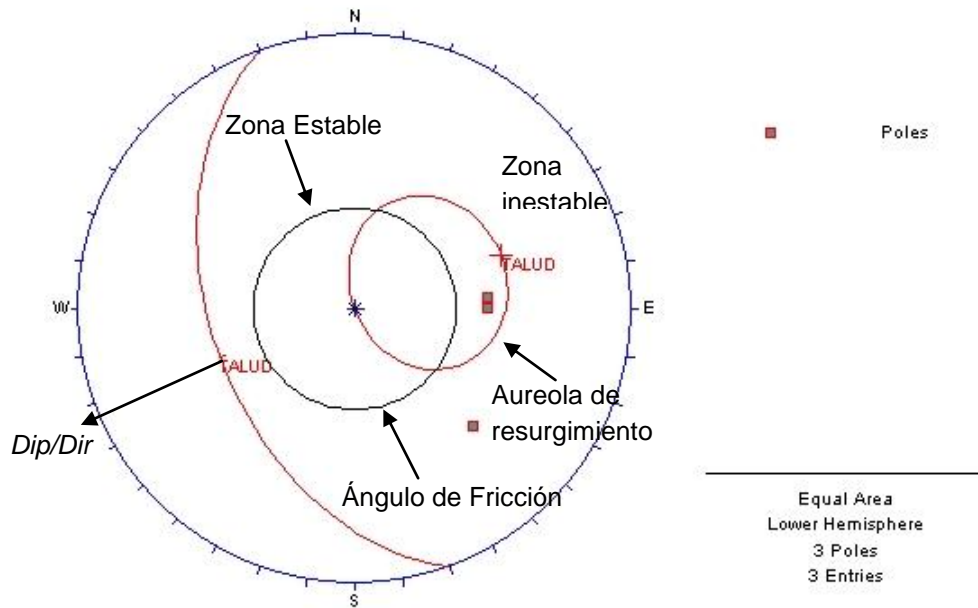
El abatimiento de la pendiente del talud es económicamente posible en taludes de poca altura, pero no ocurre lo mismo en taludes de gran altura, debido al aumento exagerado de volumen del material de corte con el aumento de

la altura. El abatimiento por relleno en ocasiones no es posible por falta de espacio en el pie del talud.

Para la determinación del ángulo de corte del talud se puede calcular mediante la aureola de resurgimiento o círculo de falla (con diagramas estereográficos en donde los factores a evaluar son el buzamiento del talud y los polos de las familias de discontinuidades que conforman los mecanismos de falla), encontrados en las estaciones geomecánicas.

El método consiste en dibujar el círculo mayor correspondiente a la dirección del buzamiento del talud con su respectivo polo, luego se traza la aureola que va desde el centro de la proyección estereográfica hasta el polo del talud, se coloca el valor del ángulo de fricción interna a partir del centro de la proyección, como se presenta en la figura 43 que representa a la cuña localizada en la estación geomecánica 9 (EG 9).

FIGURA 43
AUREOLA DE RESURGIMIENTO, ÁNGULO DE FRICCIÓN Y
TALUD (EG 9)

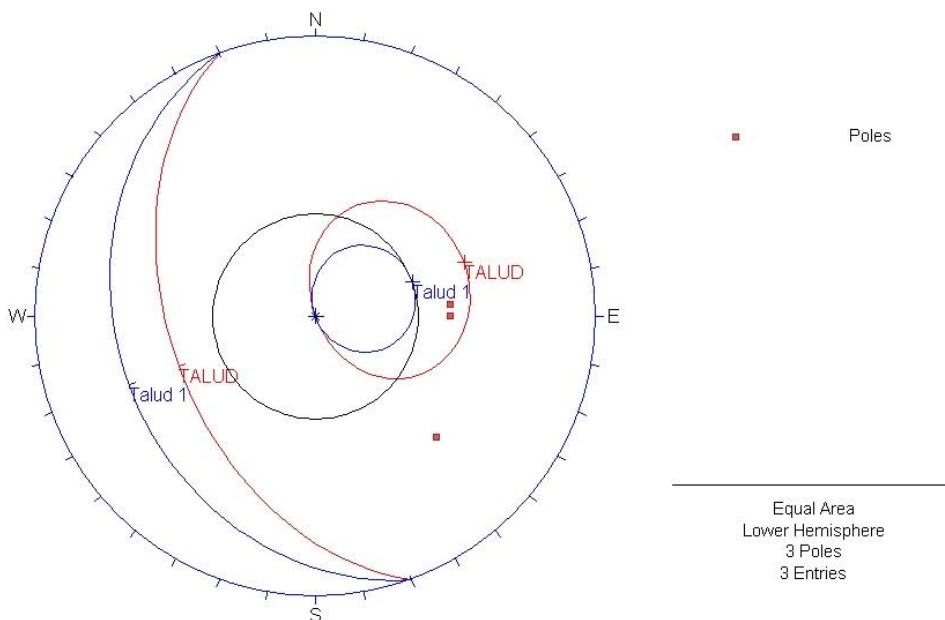


Datos estación geomecánica 9: $Ta = 47^\circ/250$; $i = 40^\circ/270$, $\Phi = 32^\circ$

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Para lograr estabilizar el talud se debe dejar afuera de la aureola de resurgimiento los polos de las discontinuidades del mecanismo de rotura ($i = 40^\circ/270$), y está a la vez dentro del ángulo de fricción interna como se muestra en la figura 44 para lograr un factor de seguridad de 1.

FIGURA 44
DIAGRAMA ESTEREOGRÁFICO CON EL ÁNGULO DE CORTE
PARA LA ESTACIÓN GEOMECÁNICA 9 (EG 9)

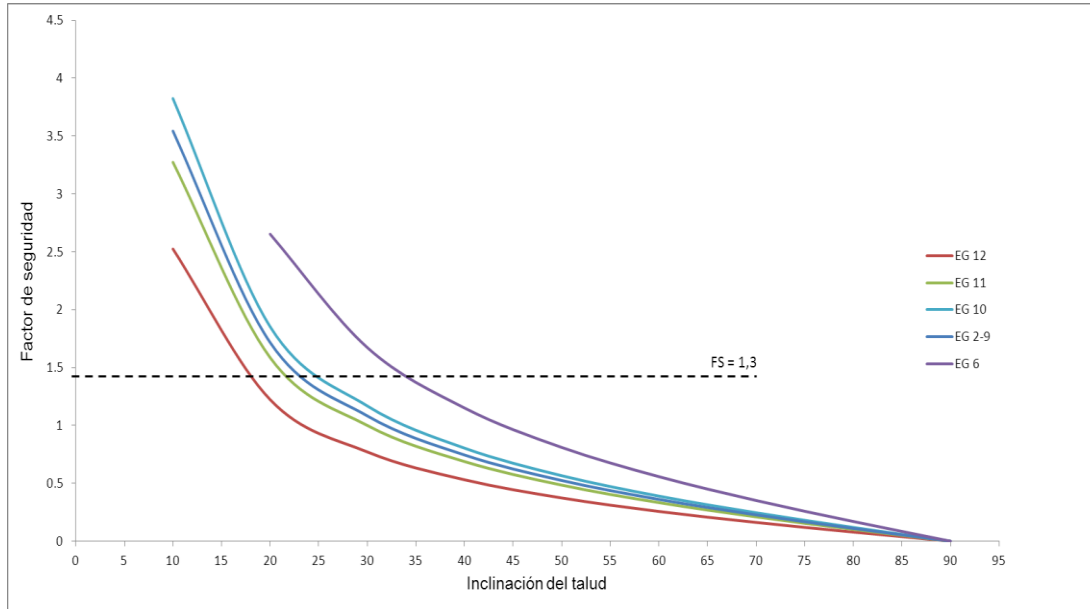


TALUD= $47^\circ/250$; Talud 1= $32^\circ/250$ $F_s= 1$

Fuente: Investigación de campo 2 015.

También se pueden utilizar las curvas generadas a partir de los cálculos del factor de seguridad para los mecanismos planares y cuñas, estas curvas están en función del ángulo de fricción interna vrs la inclinación del talud, la figura 45 muestra las curvas para el cálculo de la modificación del talud para las estaciones geomecánicas que presentan roturas del tipo planar.

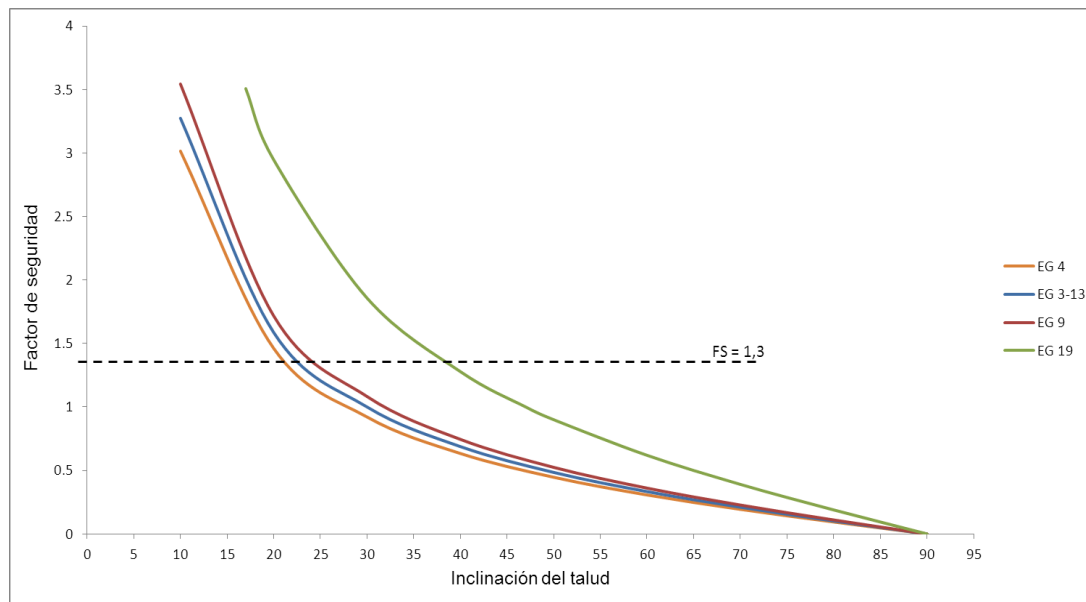
FIGURA 45
ÁBACO DE MODIFICACIÓN DEL TALUD, EN FUNCIÓN DEL
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA VRS LA INCLINACIÓN DEL
TALUD PARA EL MECANISMO DE ROTURA PLANAR



Fuente: Investigación de campo 2 015.

La figura 46 muestra las curvas para el cálculo de la modificación del talud para las estaciones geomecánicas que presentan roturas de cuñas.

FIGURA 46
ÁBACO DE MODIFICACIÓN DEL TALUD, EN FUNCIÓN DEL
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA VRS LA INCLINACIÓN DEL
TALUD PARA EL MECANISMO DE ROTURA EN CUÑA



Fuente: Investigación de campo 2 015.

Al considerar estas metodologías de modificación para los mecanismos de rotura planar y cuña, los resultados para la corrección de taludes se muestran a continuación.

En la tabla 23 se tienen los resultados para los mecanismos de rotura planares, están considerados los mecanismos reales y potenciales encontrados en las estaciones geomecánicas.

TABLA 23
CORRECCIÓN DE TALUDES MECANISMO PLANAR

Corrección de taludes mecanismos de rotura planar					
EG	Plano	Talud	Inclinación talud original	Inclinación talud corregido (proyección estereográfica)	Inclinación talud corregido (Abaco de abatimiento del talud) $F_s = 1,3$
EG 2	43/272	80/280	80°	32°	25°
EG 6	62/278	53/297	53°	53°	37°
EG 9	40/265	47/250	47°	32°	25°
EG 10	75/119	68/115	68°	68°	27°
EG 11	86/090	60/090	60°	60°	23°
EG 12	75/112	42/110	42°	42°	19°

EG = Estación Geomecánica

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Para las estaciones geomecánicas 6, 10, 11 y 12 quienes tienen mecanismos planares potenciales, los valores de los taludes con el método de la aureola de resurgimiento no fueron modificados, puesto que los polos de las discontinuidades se localizan fuera de la misma. Serán inestables y cumplirán con los criterios de rotura planar cuando sea incrementado las pendientes de los mismos.

Con el ábaco de modificación, si se presentan modificaciones a los taludes, esto a que el factor de seguridad está regido por el ángulo de fricción interno del material, cuyos valores se encuentran entre los 24° a 44°.

Para los mecanismos de rotura en cuña, con la utilización de la aureola de resurgimiento se utilizó el valor del buzamiento de la intersección de los planos que conforman a la cuña, y se les trato con el mismo procedimiento de las roturas planares, la obtención de los nuevos valores de inclinación de los taludes con mecanismos de rotura en cuña se muestran en la tabla 24.

TABLA 24
CORRECCIÓN DE TALUDES MECANISMO DE CUÑAS

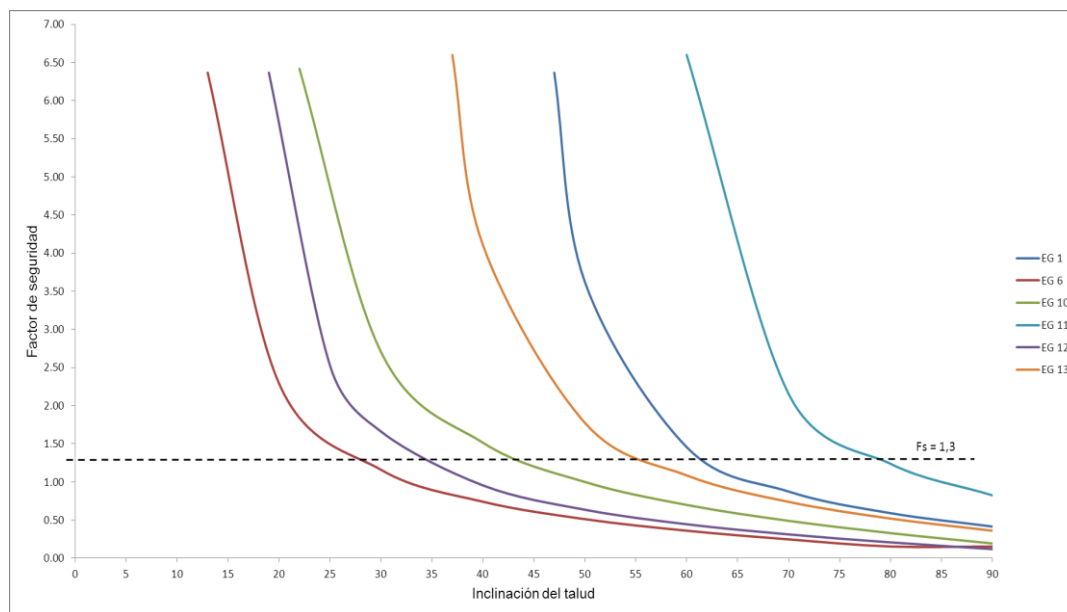
Corrección de taludes mecanismo de rotura en cuña					
EG	Plano <i>i</i>	Talud	Inclinación talud original	Inclinación talud corregido (proyección estereográfica)	Inclinación talud corregido (Abaco de abatimiento del talud) $F_s = 1,3$
EG 3	34/290	67/285	67°	30°	23°
EG 4	31/259	33/297	33°	33°	21°
EG 9	40/270	47/250	47°	32°	25°
EG 13	47/072	37/065	37°	37°	23°
EG 19	67/279	32/327	32°	32°	39°

EG= Estación Geomecánica

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Para el mecanismo de vuelco, la corrección de taludes se llevó por medio del ábaco generado a partir de la altura del talud y el factor de seguridad mostrado en la figura 47.

FIGURA 47
ÁBACO DE MODIFICACIÓN DEL TALUD, EN FUNCIÓN DEL
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA VRS LA INCLINACIÓN DEL
TALUD PARA EL MECANISMO DE ROTURA EN VUELCO



Fuente: Investigación de campo 2 015.

Con el ábaco para las rotura en vuelco se obtuvieron los valores para el abatimiento de los taludes los cuales son mostrados en la tabla 25.

TABLA 25
CORRECCIÓN DE TALUDES MECANISMO DE VUELCO

Corrección de taludes mecanismo de rotura en vuelco				
EG	Plano	Talud	Inclinación talud original	Inclinación talud corregido (Abaco de abatimiento del talud) $F_s = 1,3$
EG 1	47/210	67/037	67°	62°
EG 6	81/100	53/297	53°	29°
EG 10	74/310	68/115	68°	45°
EG 11	35/265	60/090	60°	60°-80°
EG 12	75/315	42/110	42°	36°
EG 13	58/259	37/065	37°	37°-57°

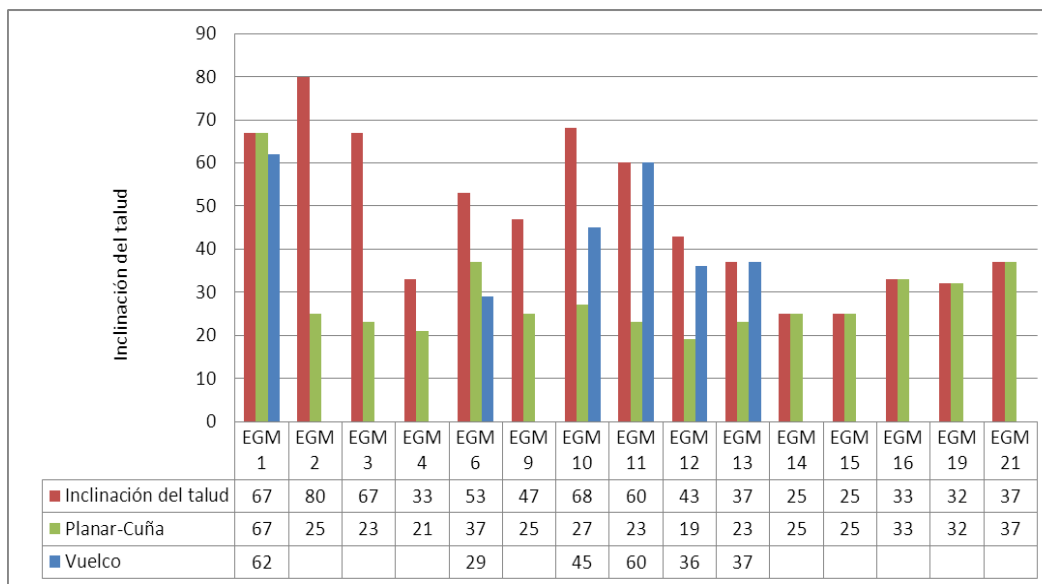
EG= Estación Geomecánica

Fuente: Investigación de campo 2 015.

Con estas metodologías quedan los ángulos aproximados para realizar trabajos de excavación en taludes sin afectar su estabilidad, previos a la instalación de las obras civiles en el área del proyecto.

La figura 48 muestra los resultados para todas las estaciones geomecánicas estudiadas en el proyecto.

FIGURA 48
MODIFICACIÓN DE TALUDES A PARTIR DEL FACTOR DE
SEGURIDAD 1,3 PARA LOS TALUDES DEL PROYECTO



Fuente: Investigación de campo 2 015.

CONCLUSIONES

- a) Con los resultados obtenidos del *RMR* se constató que existen tres clasificaciones: tres estaciones con macizos rocosos de calidad muy mala o clase V localizadas en las áreas del canal de conducción de presa a embalse sobre la Unidad de Calizas, la segunda y tercera estación en el canal de conducción hacia la tubería de presión sobre la Unidad de Lutitas, cinco estaciones de calidad mala o clase IV ubicadas en el canal de conducción en las Unidades de Calizas y Lutitas y por último siete estaciones con calidad media o de clase III en el canal de conducción, embalse, tubería de presión y casa de máquinas.
- b) Para la clasificación geomecánica del talud o *SMR* que se basa en la orientación de las fracturas y de los mecanismos de rotura planar, cuña y vuelco que estas generan, se encontró que los taludes están dentro de la clasificación de normal o de clase III a muy mala o de clase IV, ubicándolos en términos de estabilidad de parcialmente estables a inestables, siendo la reexcavación, colocación de drenajes superficial y profundo, lanzamiento de concreto y reforzamiento con anclajes los métodos de estabilización sugeridos por el *SRM*.
- c) El 62% de las estaciones se clasificaron entre roca moderadamente dura a muy dura con resistencias entre los 25 MPa a 100 MPa con longitudes de discontinuidades bajas de 1 m a 3 metros y aberturas de 1 mm a 5 mm, son rugosas a ligeramente rugosas, juntas con poca humedad o en la mayoría de los casos secas, indicativo que los macizos rocosos tienen gran resistencia al corte, no están afectados

tectónicamente y poseen porosidad secundaria obtenida mediante al peso de los bloques que constituye al macizo rocosos.

- d) Los mecanismos de rotura encontrados en las estaciones geomecánicas por medio de las discontinuidades y con la utilización de proyecciones estereográficas dieron como resultado la identificación de tres tipos de movimientos, planar, cuña y vuelco, los cuales fueron evaluados con sus respectivos análisis cinemáticos y contrastados con el factor de seguridad para identificar qué movimientos son los que puedan provocar una inestabilidad en los taludes; el resultado fue de siete estaciones con mecanismo de vuelco, seis con mecanismo planar y cinco con mecanismo de cuñas.

- e) Los mecanismos de protección y sostenimientos a aplicar en la estabilidad de los taludes en función de los mecanismos de rotura encontrados son los de minimizar la caída de rocas por medio de la colocación de mallas, muros de concreto y diques y para realizar un aumento de seguridad; en los taludes se tendrá que aplicar métodos correctivos: en primer lugar anular la entrada de agua de escorrentía al talud abriendo zanjas de coronación completamente impermeabilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas lluvia; además la corrección del talud de tal manera que el círculo de falla crítico se haga más largo y profundo, esto se obtiene por medio del corte o relleno.

RECOMENDACIONES

- a) Para complementar la caracterización global del macizo rocoso es importante realizar un estudio hidrogeológico, una caracterización geotécnica a través de perforaciones con recuperación de testigos o núcleos, para obtener un mejor resultado de parámetros como el *RQD*, grado de alteración del macizo y/o resistencia de la matriz rocosa con ensayo de compresión simple. Además de utilizar otros métodos complementarios como el ensayo de discontinuidades, *SMR*, *Q* de Barton o el *GSI* (*Geological Stress Index*).
- b) Se deberán de realizar obras de control y saneamiento (corte y relleno, drenajes superficial y profundo, lanzamiento de concreto y reforzamientos) en las siete estaciones geomecánicas en donde los taludes no cumplen con los factores de seguridad normados por la AGIES (Norma de Seguridad Estructural 2.1-10) que establece que los factores de seguridad para obras Tipo III deberán ser mayores a 1,3.
- c) Para la medición de parámetros geomecánicos utilizados por la clasificación de macizos rocosos *RMR* es conveniente utilizar los ábacos existentes para cada uno de ellos, con el fin de unificar los criterios de evaluación (si hubiere dos o más personas laborando en la caracterización geomecánica del macizo).
- d) Se deberá tener especial cuidado a la hora de obtener la resistencia de la matriz rocosa, *RQD*, longitud de las discontinuidades y la presencia

de agua entre las juntas ya que son las variables que poseen mayor influencia en los resultados del *RMR*.

- e) Se deberá de utilizar las proyecciones estereográficas conjuntamente con el *SRM* para permitir una clasificación más completa de los mecanismos de rotura existentes en el área de trabajo, el primero identificará el tipo de rotura el segundo la relación existente entre las roturas y la influencia que estas puedan tener en la estabilidad del talud así como algunas medidas de remediación para aumentar la seguridad del mismo.
- f) La aplicación de metodologías para la caracterización de macizos rocosos (*RMR* y *SRM*) proporciona una zonificación verídica de las zonas susceptibles a sufrir inestabilidades, empleándose como herramientas de planificación en las fases previas de construcción del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Alegre, José María. *Caracterización geológica y geotécnica del proyecto hidroeléctrico El Tuma La Dalia*. El Tuma, Matagalpa, Nicaragua: Hidralia Energía, 2 011.
- Armas Zagoya, Juan Miguel. *Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamps., México*. Tesis de Maestría en Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2 004.
- Bienawski, Richard, ZT. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual For Engineers and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York, United States of America: Wiley-Interscience, 1 989.
- Caal Caal, Cristian Desiderio. *Estudio geotécnico de macizos rocosos ubicados sobre la carretera AV-29, San Antonio Senahú, Alta Verapaz*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala: Carrera de Geología, 2 014.
- Cosillo Pinto, Alan. *Consideraciones geológico-geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos*. Tesis Ingeniero Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala: Facultad de Ingeniería, 1 999.
- Deere, Don U. "Technical Description of Rocks Cores for Engineering Purpose". *XIIIth Colloquium of the International Society of Rock Mechanics*. 1, 1., (October, 1 962): 16-22.
- Delgado R, Tomas. Et. Al. "Propuesta metodológica para la aplicación del Slope Mass Rating Continuo (SMR-C) mediante un sistema de información geográfica". *VII Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables*. Barcelona, España: CINME, 2 009.
- Duncan, Wyllie C. and Christopher W. Mah. *Rock Slope Engineering, civil and mining. Based on the third edition by E Hoek and J Bray*. New York, United States of America: Spon Press Taylor & Francis Group. 2 004.

Ecoservicios Integrados. *Construcción y operación de la hidroeléctrica Pojóm 1. Estudio de evaluación del impacto ambiental*. Guatemala: ECOSISA, 2 010.

González de Vallejo, Luis, Et. Al. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Prentice Hall, 2 002.

Goodman, R.E. and J.W. Bray. "Toppling of Rock Slopes" *Proc. Specialty Conference of Rock Engineering for Foundations and Slopes*. 2, 5., (August 1 976): 201-234.

Hudson A. John. *Comprehensive Rock Engineering: principles, practices and projects. A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating*. M. R. Romana. Great Britain: Pergamon Press, 1 993.

Munir, K, Farooq and H. Mujtaba. "A comparative Analysis of Rock Mass Classification systems for hydropower projects of Pakistan" *Pakistan Journal of Science*. 65, 1., (March 2 013): 34-40.

Norrish, N. & Wyllie, D. "Rock Slope Stability Analysis, Chp. 15, Landslide Investigation and Mitigation". *Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council*. United States of America: National Academy of Sciences, 1 996.

Palmström, A. "The volumetric joint count- a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing." *4th IAEG Congress*. New Delhi, India: 1 982.

Universidad Rafael Landívar –URL–, *Perfil Ambiental de Guatemala 2003: estado del uso actual de la tierra en Guatemala*. Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, 2 003.

V.ºB.º



Adán García Velíz

Adán García Velíz
Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa
Bibliotecario



ANEXOS

Estación No. 13		Proyecto: PH El Pajom		Ubicación: Aldea Ixquisis-Fojom															
Localización Coordenadas UTM:		Recopilado por: Bernardo Daetz		Fecha:															
X: 670927		Y: 1776748		Litotipo: Caliza															
Observaciones:		So = estratificación; Js = juntas; Fs = fallas; Se observaron bloques con dimensiones de 33 cm de ancho por 97 cm de alto; Se observaron bloques con dimensiones de 45 cm de ancho por 70 cm de alto																	
DAB planos		Resistencia de la matriz rocosa		Separación entre diaclasas		Longitud discontinuidad		Abertura discontinuidad		Rugosidad		Relleno		Alteración		Agua Frédica		Perfil No.	
Tipo de plano		Carga Puntual		Muy amplia		Muy baja		Muy cerrada		Muy rugosa		Relleno duro		I Inalterada		Seco		RQD (115-3,3 JV)	
Dirección azimutal		> 250		Amplia		Muy baja		Muy cerrada		Rugosa		Relleno duro		II Ligeramente alterada		Ligeramente húmedo		Buena	
buzamiento		100-250		Moderada		Baja		Notiene		Ligeramente rugosa		Relleno duro		III Moderadamente alterada		Húmedo		Buena	
		50-100		Cerca		Meda		Notiene		Ondulada		Relleno blanco		IV Muy alterada		Goteando		Buena	
		25-50		Muy cerca		Alta		Notiene		Suave		Relleno blanco		V Descompuesta		Agua fluyendo		Buena	
		< 25		Muy amplia		Muy alta		Notiene		Notiene		Relleno blanco						Buena	
		> 2m		Amplia		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		0,6-2,0m		Moderada		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		0,2-0,6m		Cerca		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		0,08-0,2m		Muy cerca		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		< 0,08m		Muy baja		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		< 1 m		Baja		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		1-3m		Meda		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		3-10m		Alta		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		10-20m		Muy alta		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		> 20m		Abierta		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		> 5 mm		Moderadamente abierta		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		1-5mm		Cerrada		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		0,1-1 mm		Muy cerrada		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		< 0,1 mm		Notiene		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
		***		Muy rugosa		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				Rugosa		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				Ligeramente rugosa		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				Ondulada		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				Suave		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				***		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				< 5 mm		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				> 5 mm		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				< 5 mm		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
				> 5 mm		Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	
						Muy alta		Notiene		Suave		Relleno blanco						Buena	

ANEXO II

RESULTADOS CLASIFICACIÓN RMR ESTACIONES GEOMECÁNICAS

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 1

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
	puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
	puntuación		20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
	puntuación		6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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			
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
	puntuación		6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
	Puntuación		15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **62**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 1

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	62
TALUDES	-25
TOTAL	37

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 2

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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			
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE 71

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 2

Dirección y Buzamiento	muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	71
TALUDES	-60
TOTAL	11

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 3

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2		RQD	100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3		Separación entre diaclasas	> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4		Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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			
5		Meteorización	inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **57**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 3

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	57
TALUDES	-5
TOTAL	52

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 4

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **57**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 4

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	57
TALUDES	-5
TOTAL	52

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 6

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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			
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE 54
CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 6

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	54
TALUDES	-25
TOTAL	29

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 9

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **54**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 9

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	54
TALUDES	-5
TOTAL	49

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 10

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **62**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 10

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	62
TALUDES	-5
TOTAL	57

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 11

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0 m	3,0 m - 10,0 m	10,0 m - 20,0 m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **54**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 11

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	54
TALUDES	-5
TOTAL	49

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 12

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2		RQD	100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3		Separación entre diaclasas	> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4		Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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			
5		Meteorización	inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **57**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 12

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	57
TALUDES	-25
TOTAL	32

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 13

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **59**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 13

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	59
TALUDES	-25
TOTAL	34

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 14

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **43**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 14

Dirección y Buzamiento	muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables	
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	43
TALUDES	-25
TOTAL	18

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 15

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **43**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 15

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	43
TALUDES	-25
TOTAL	18

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 16

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2		RQD	100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3		Separación entre diaclasas	> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4		Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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			
5		Meteorización	inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **43**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 16

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	43
TALUDES	-5
TOTAL	38

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 19

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **47**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 19

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	47
TALUDES	-5
TOTAL	42

CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI 1 989) EG # 21

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10,00 - 4,00	4,00 - 2,00	2,00 - 1,00	Compresión simple		
		C. Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5,00	5,00 - 1,00	< 1
		puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
		puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	2 m - 0,6 m	0,6 m - 0,2 m	0,2 m - 0,06 m	< 0,06 m		
		puntuación	20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		< 1 m	1,0 m - 3,0m	3,0 m - 10,0m	10,0 m - 20,0m	> 20 m		
		puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura		nada	< 0,1 mm	0,01mm - 1,0mm	1 mm - 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		
5	Meteorización		inalterado	ligeramente meteorizado	moderadamente meteorizado	altamente meteorizado	completamente meteorizado		
		puntuación	6	5	3	1	0		
6	Agua freática	Juntas sin relleno	plana, cerrada y seco	seco, sin evidencia de flujo	seco, con evidencia de circulación de agua	húmedo, sin agua libre	goteo ocasional sin flujo continuo	flujo continuo (l/min) y presión	
		Juntas con relleno	consolidado y seco	húmedo sin agua libre	mojado con goteo ocasional	señales de lavado, flujo continuo (l/min)	localmente lavado, flujo considerable (l/min) y presión	lavado, presiones elevadas	
		Puntuación	15	15	10	7	4	0	

TOTAL PUNTAJE **47**

CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES EG # 21

Dirección y Buzamiento		muy favorables	favorables	medias	desfavorables	muy desfavorables
Puntuación	taludes	0	-5	-25	-50	-60

TOTAL PUNTAJE	47
TALUDES	-5
TOTAL	42

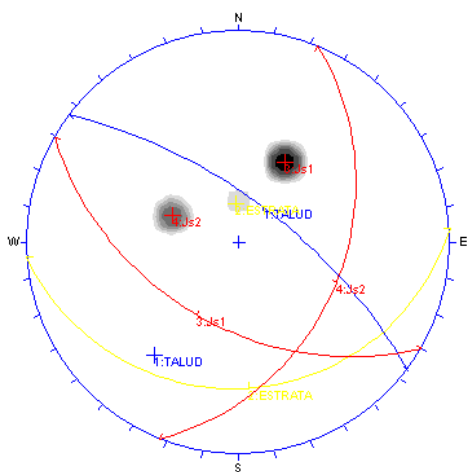
CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	muy buena	buena	media	mala	muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

ANEXO III

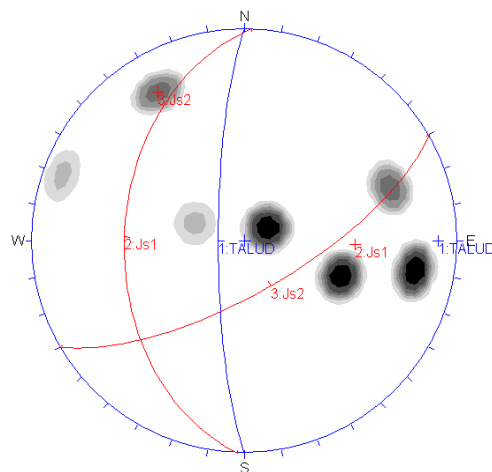
ESTEREOGRAMAS (n= cantidad de datos recolectados en campo)

EG # 1



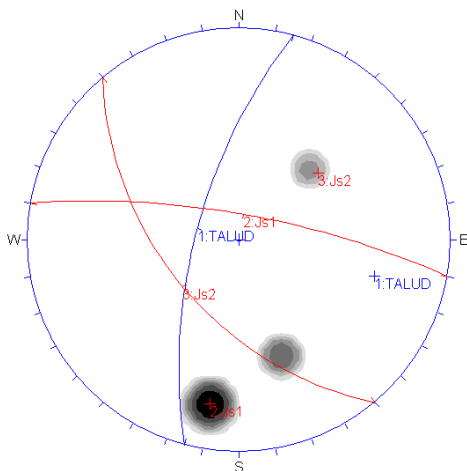
Talud= N37E/67E n= 21

EG # 2



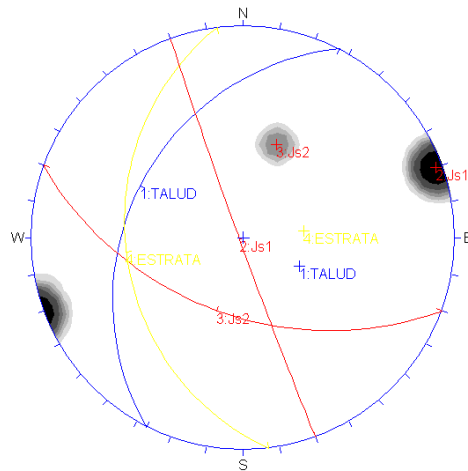
Talud= N/80W n=15

EG # 3



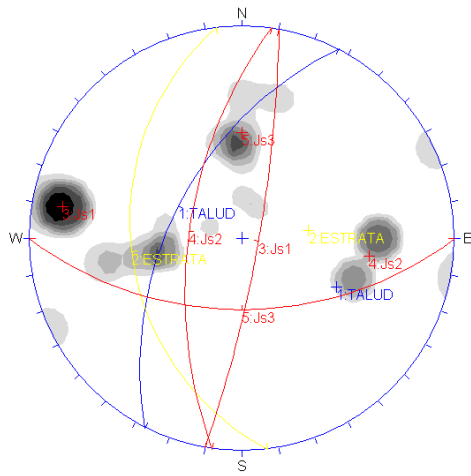
Talud= N15E/67NW n=27

EG # 4



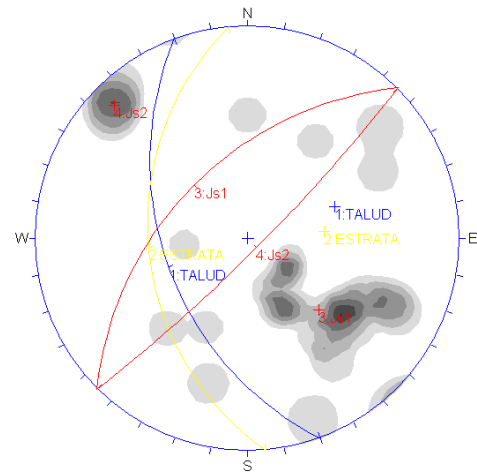
Talud= N27E/33NW n= 25

EG # 6



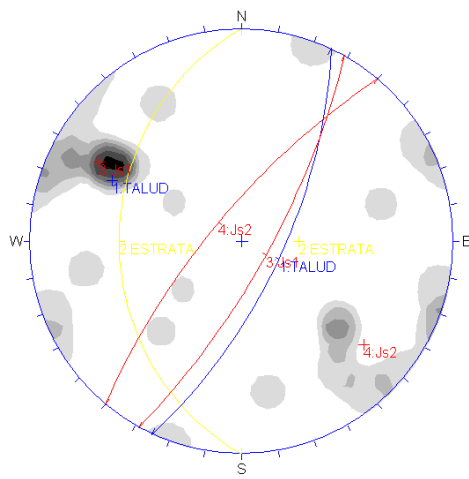
Talud= N27E/53NW n=33

EG # 9



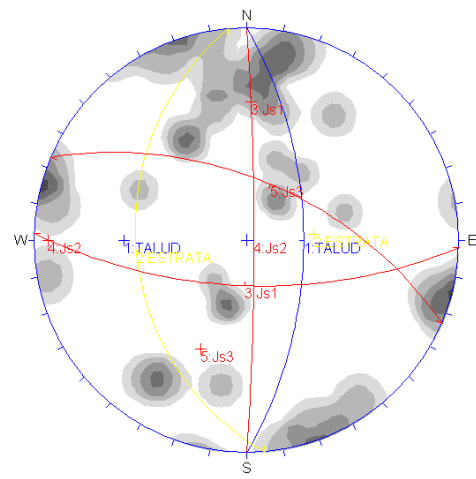
Talud= N20W/47SW n=28

EG #10



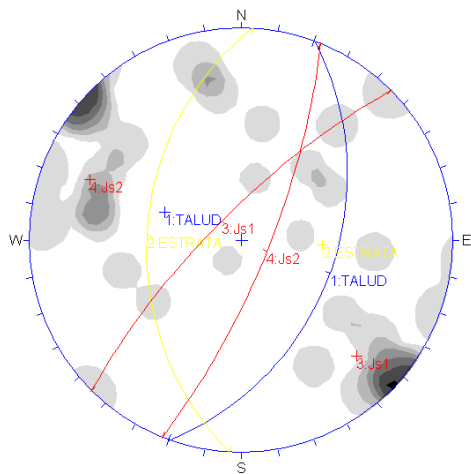
Talud= N25E/68SW n=25

EG # 11



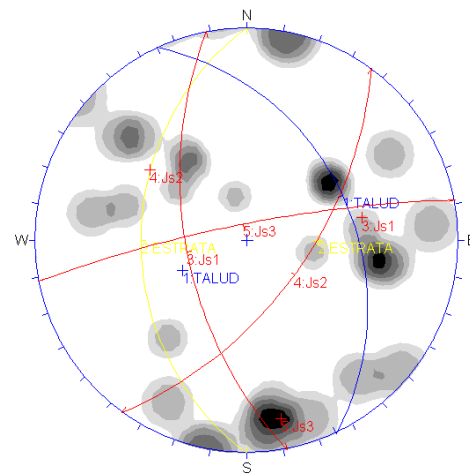
Talud= N/60E n=30

EG # 12



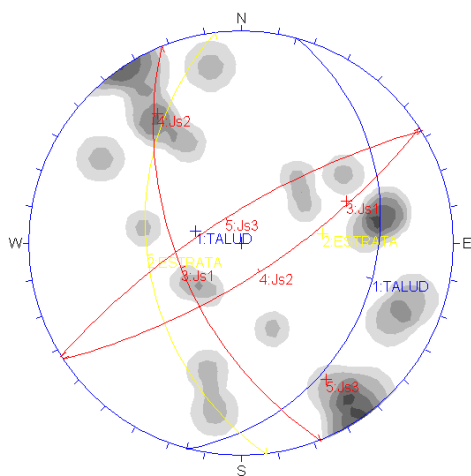
Talud= N20E/43SE n=26

EG # 13



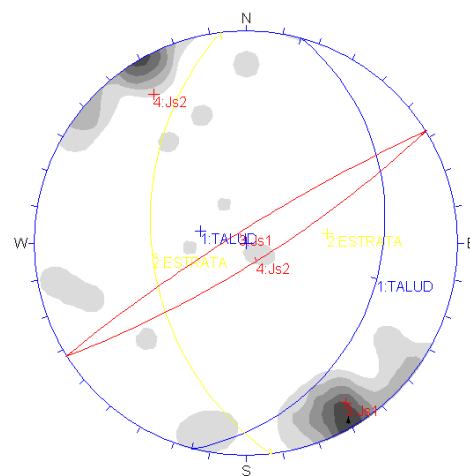
Talud= N25W/37NE n=28

EG # 14



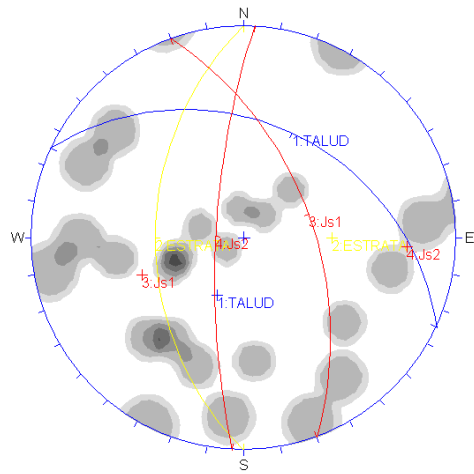
Talud= N15E/25SE n=23

EG # 15



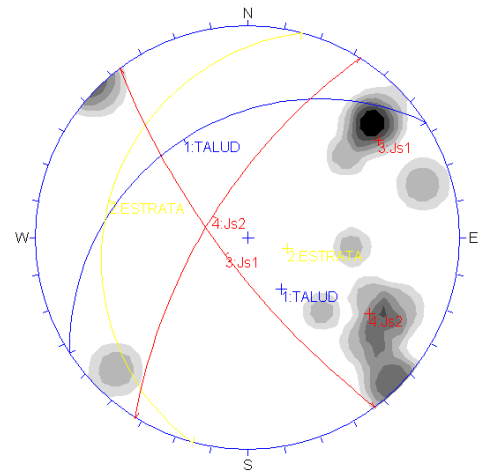
Talud= N15E/25SE n=24

EG # 16



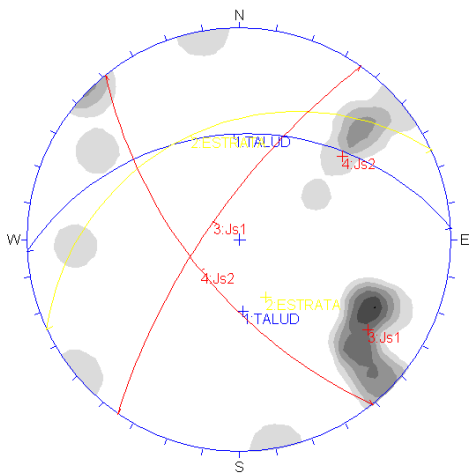
Talud= S65E/33NE n=23

EG # 19



Talud= N57E/32NW n=14

EG #21

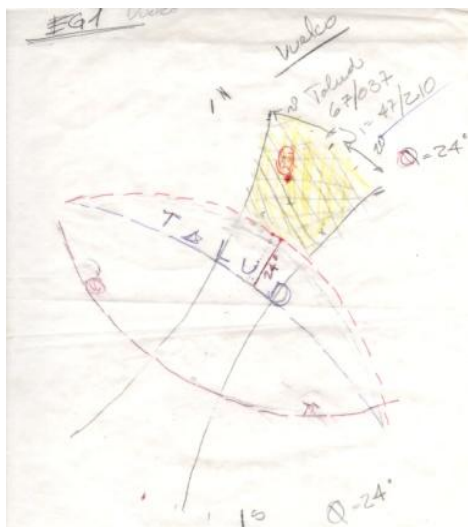


Talud= N87E/37NW n=17

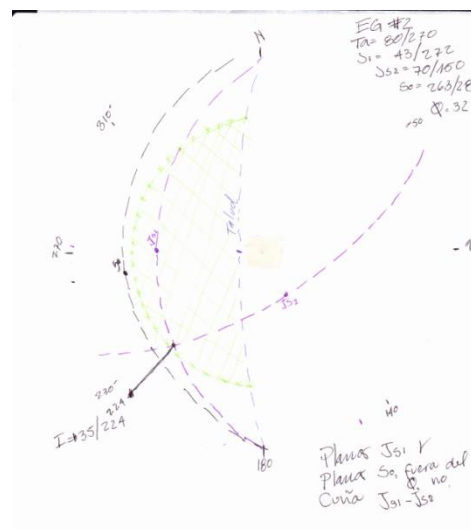
ANEXO IV

IDENTIFICACIÓN DE LAS ROTURAS EN ROCA DE LAS ESTACIONES GEOMECÁNICAS

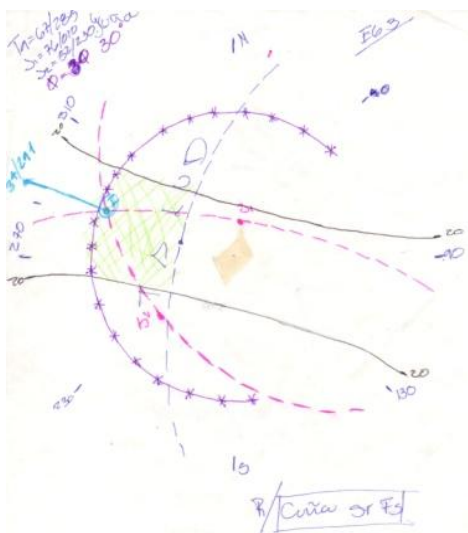
EG # 1



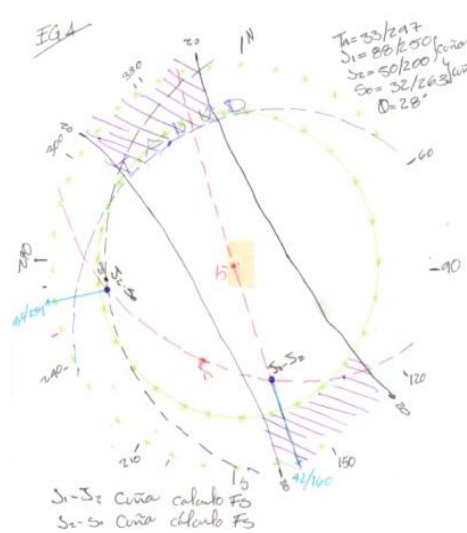
EG # 2



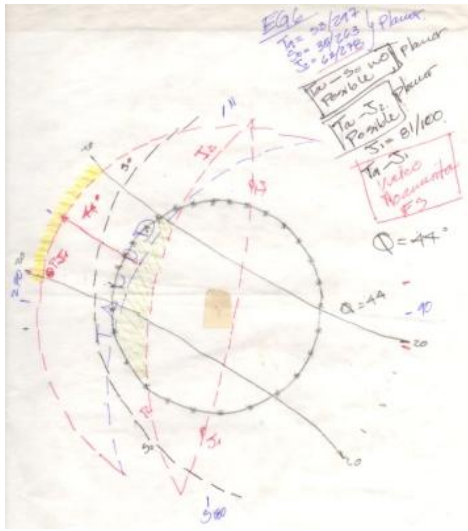
EG # 3



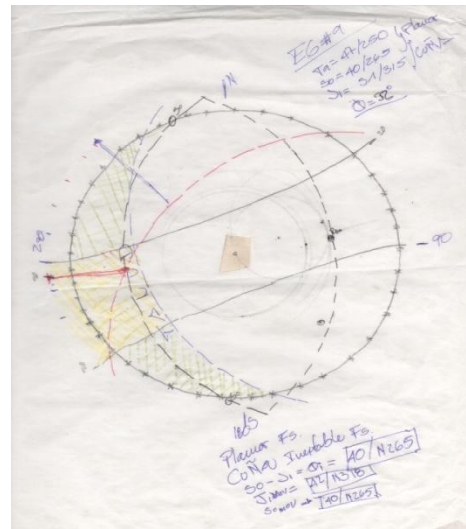
EG # 4



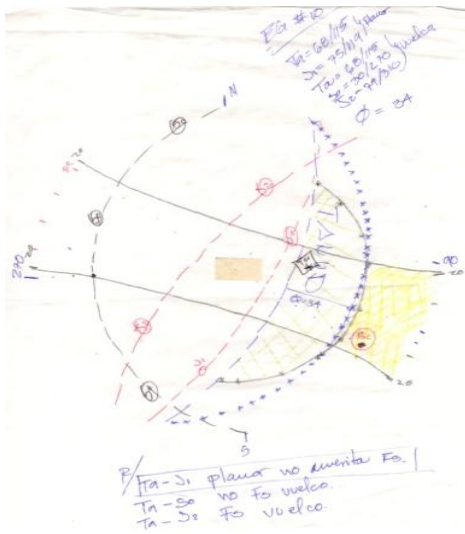
EG # 6



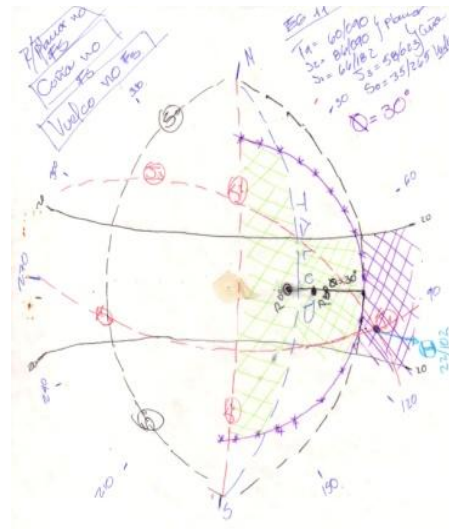
EG # 9



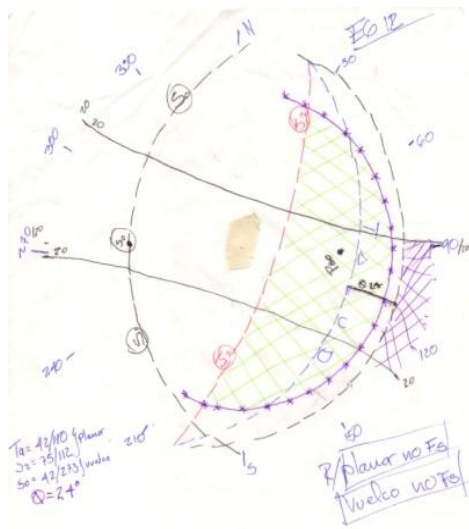
EG # 10



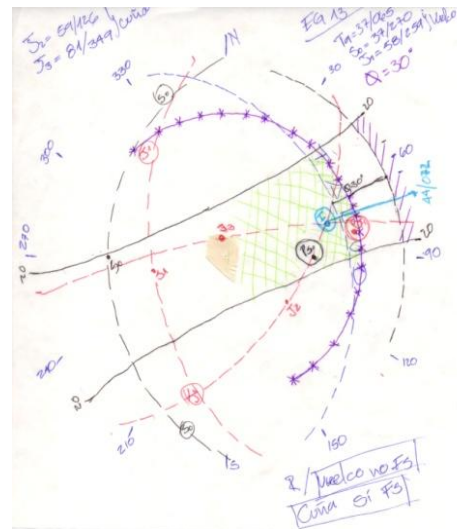
EG # 11



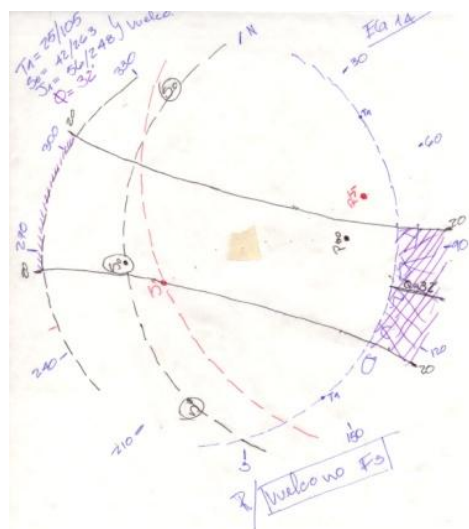
EG # 12



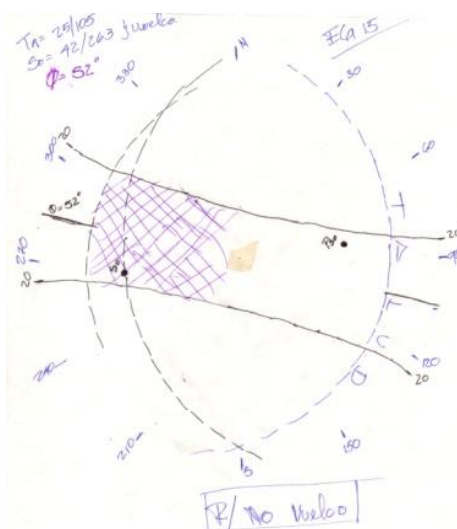
EG # 13



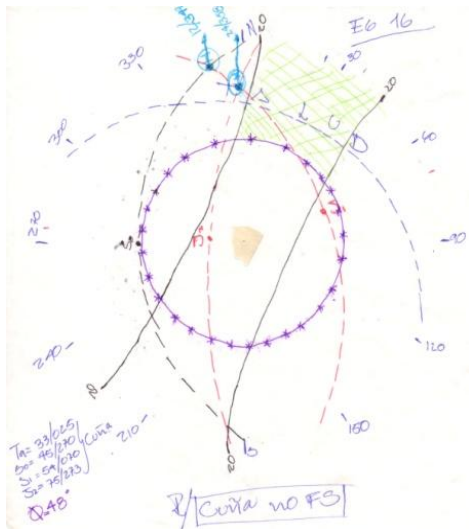
EG # 14



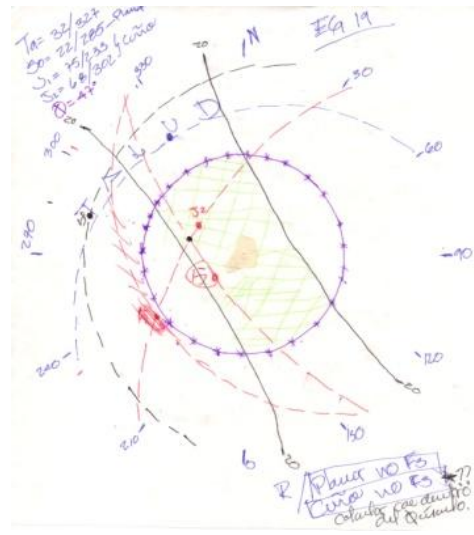
EG # 15



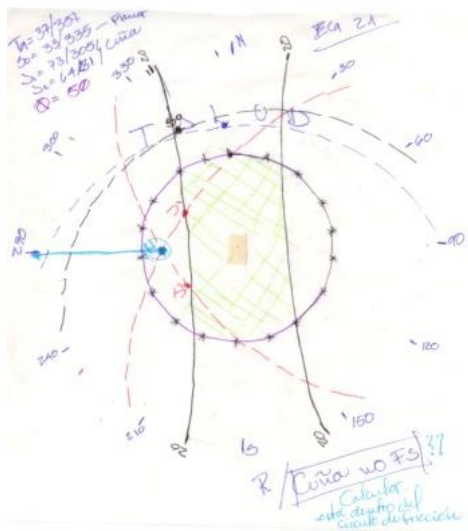
EG # 16



EG # 19



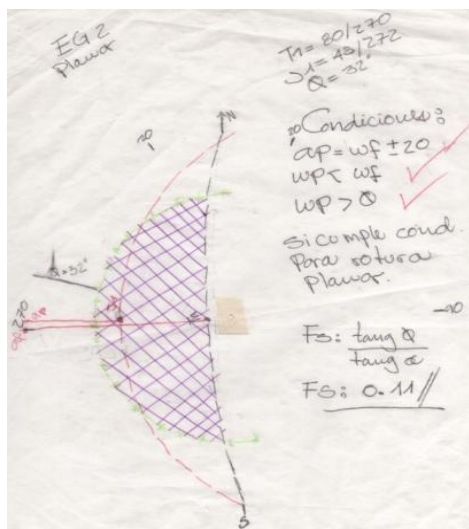
EG # 21



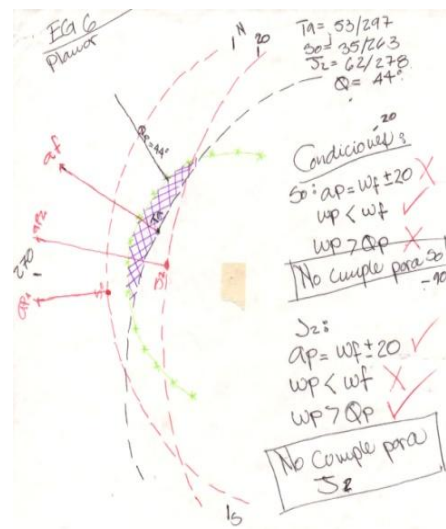
ANEXO V

MECANISMOS DE ROTURA PLANAR

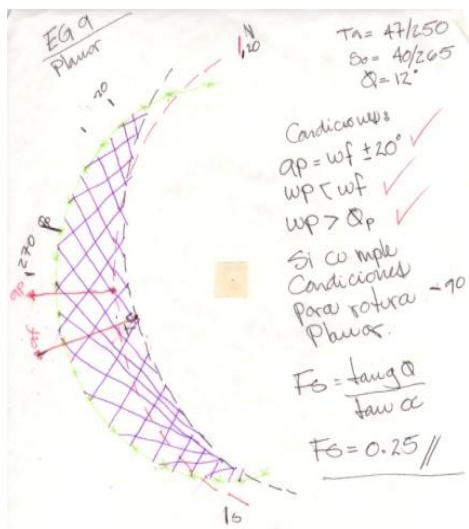
EG # 2



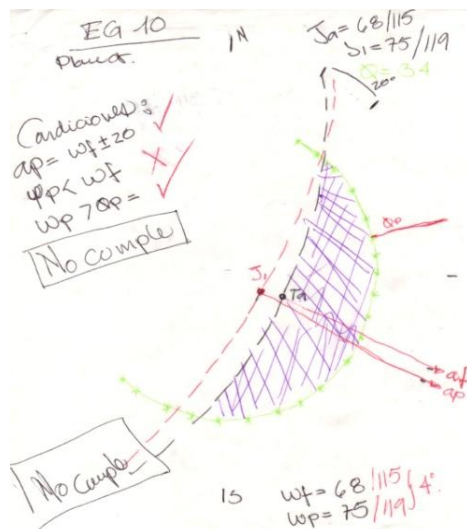
EG # 6



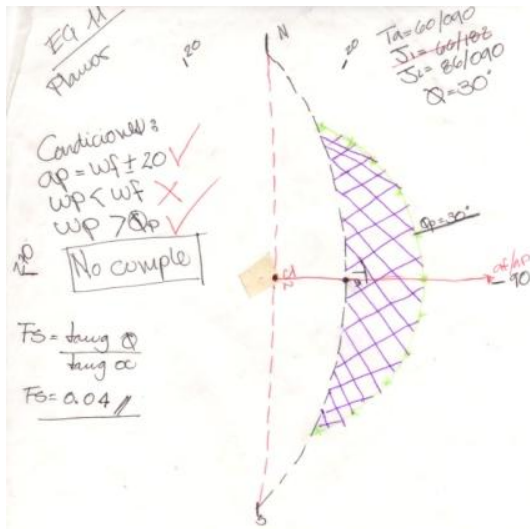
EG # 9



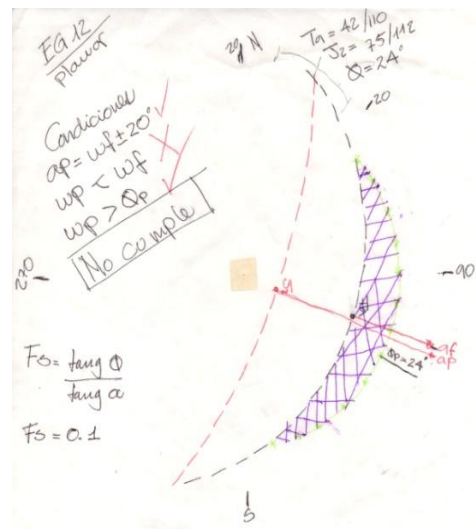
EG # 10



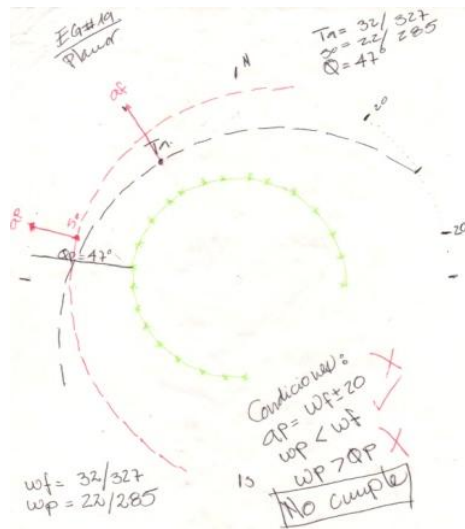
EG # 11



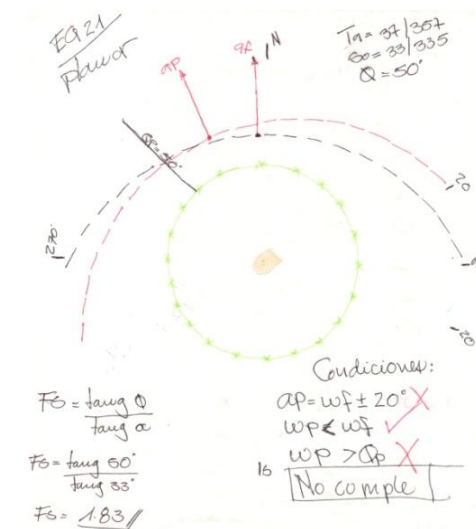
EG # 12



EG # 19

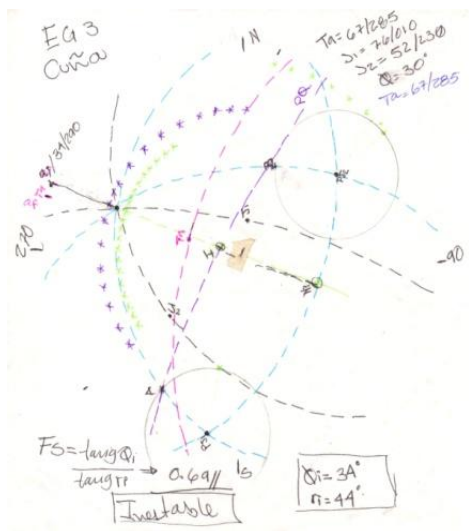


EG # 21

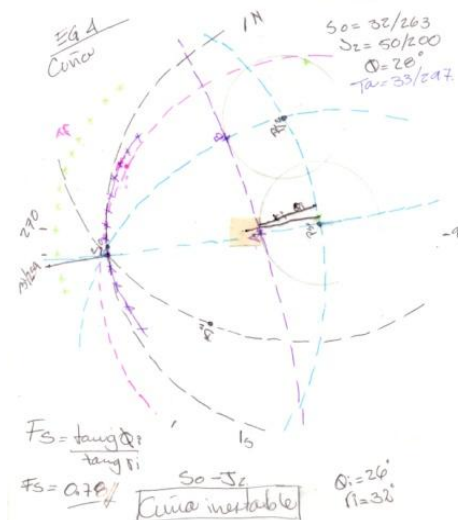


ANEXO VI MECANISMO DE ROTURA EN CUÑAS

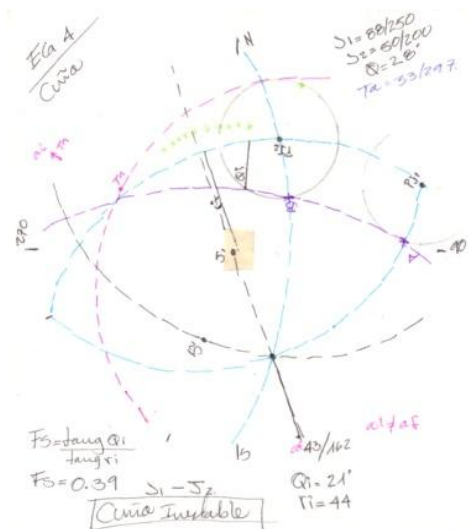
EG # 3



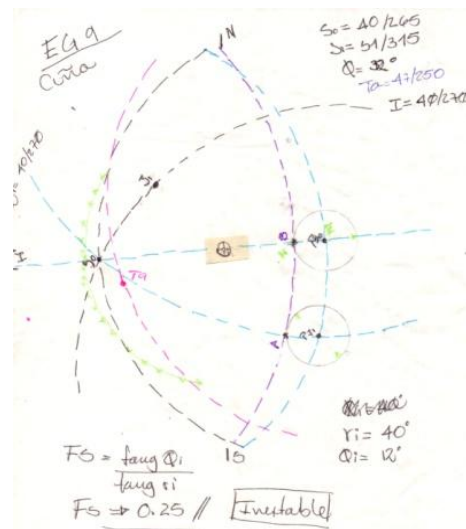
EG # 4



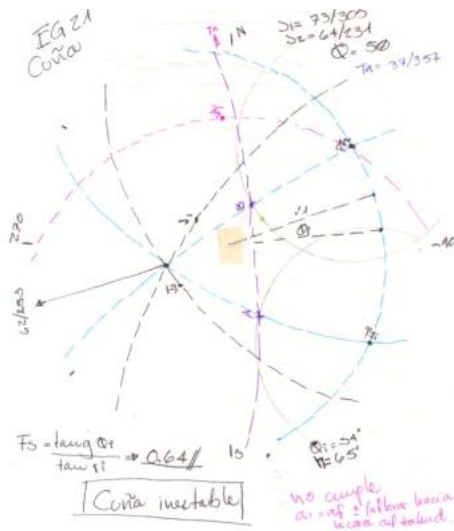
EG # 4



EG # 9



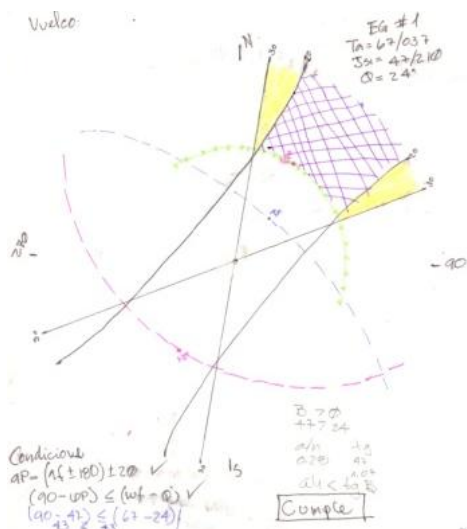
EG # 21



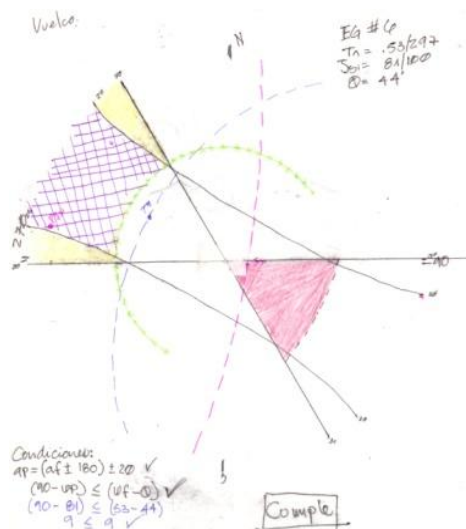
ANEXO VII

MECANISMO DE ROTURA EN VUELCO

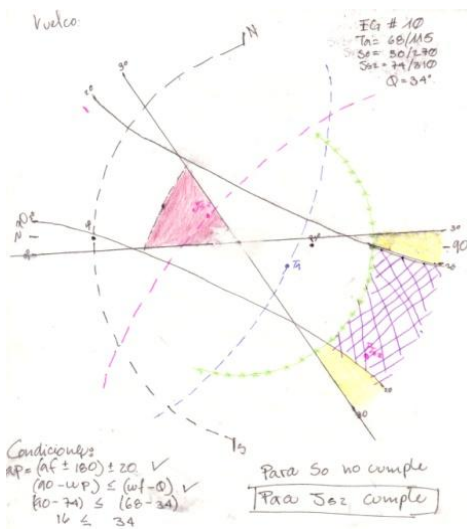
EG # 1



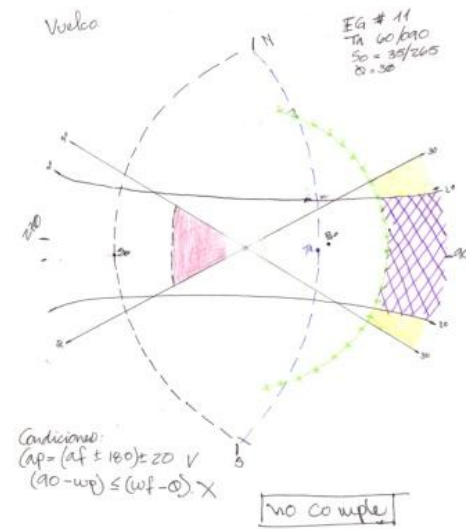
EG # 6



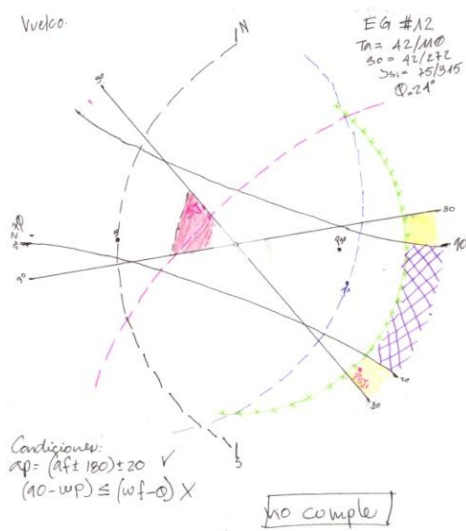
EG # 10



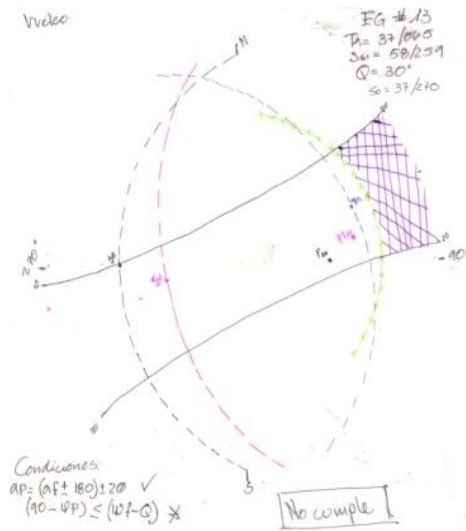
EG # 11



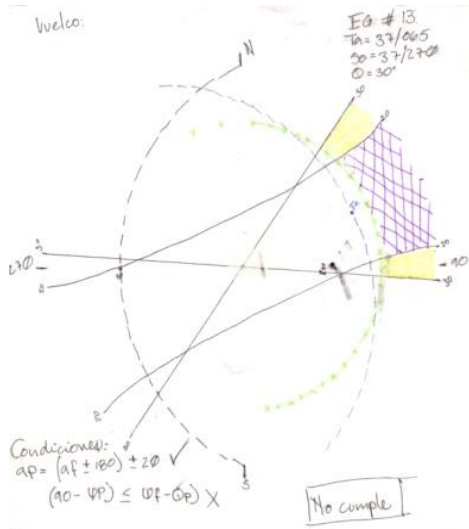
EG # 12



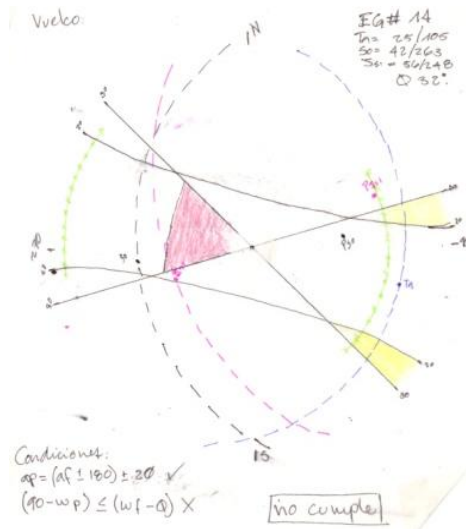
EG # 13



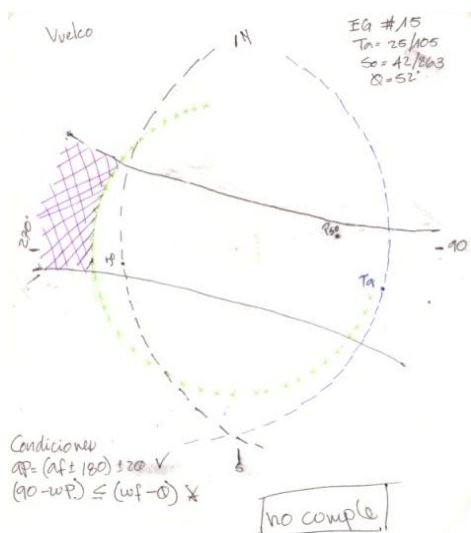
EG# 13



EG # 14



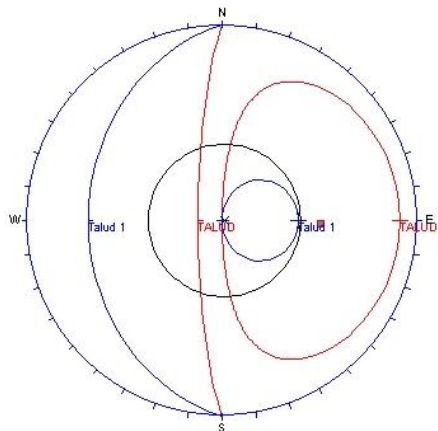
EG # 15



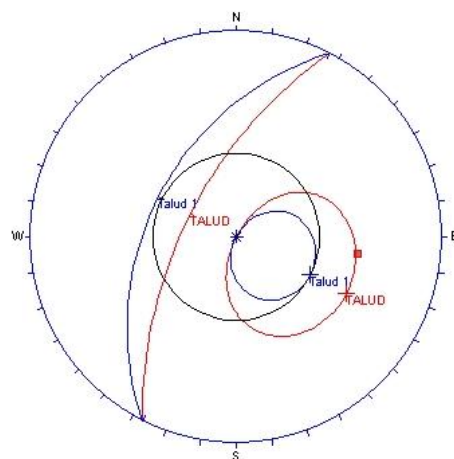
ANEXO VIII

AUREOLA DE RESURGIMIENTO MECANISMOS PLANARES

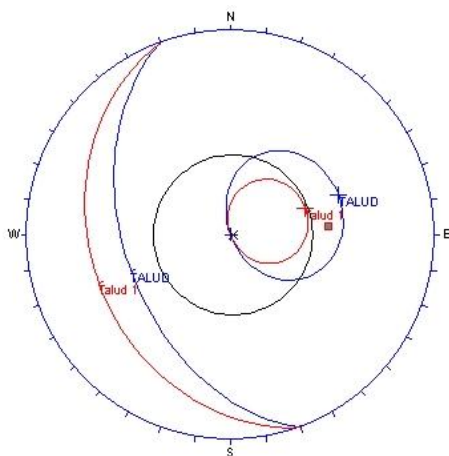
EG 2



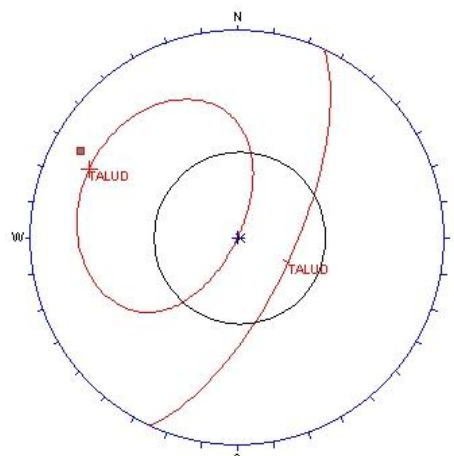
EG 6



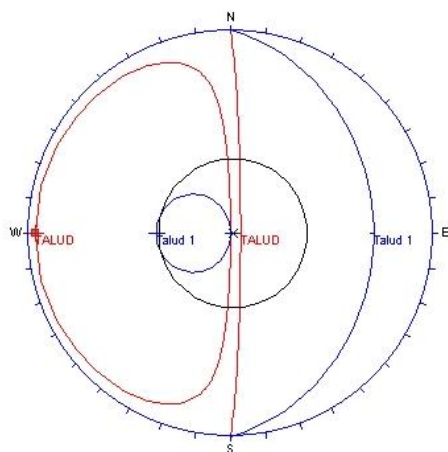
EG 9



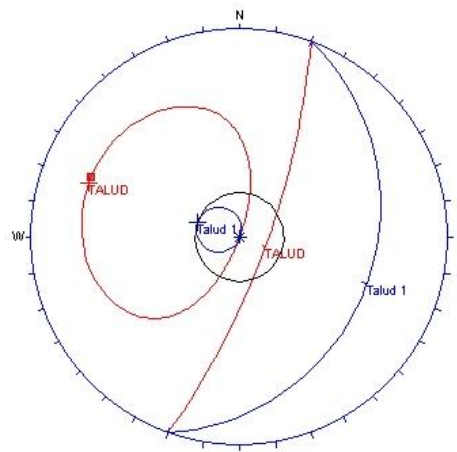
EG 10



EG 11

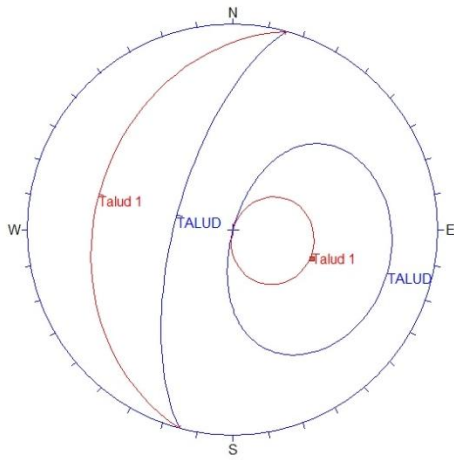


EG 12

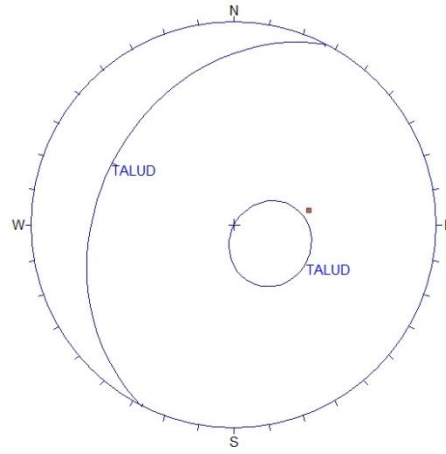


AUREOLA DE RESURGIMIENTO MECANISMO DE CUÑAS

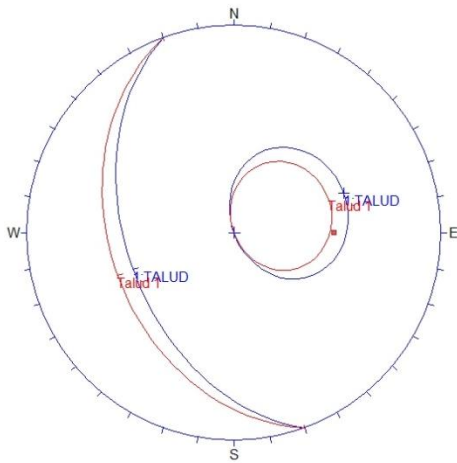
EG 3



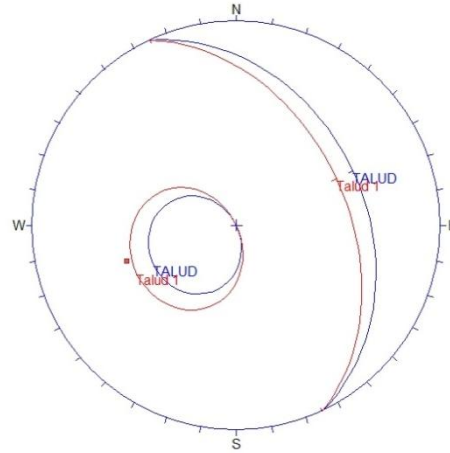
EG 4



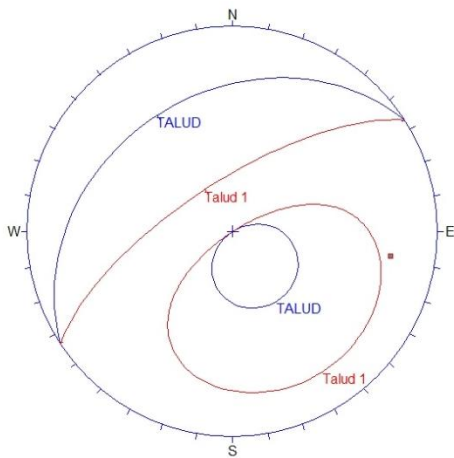
EG 9

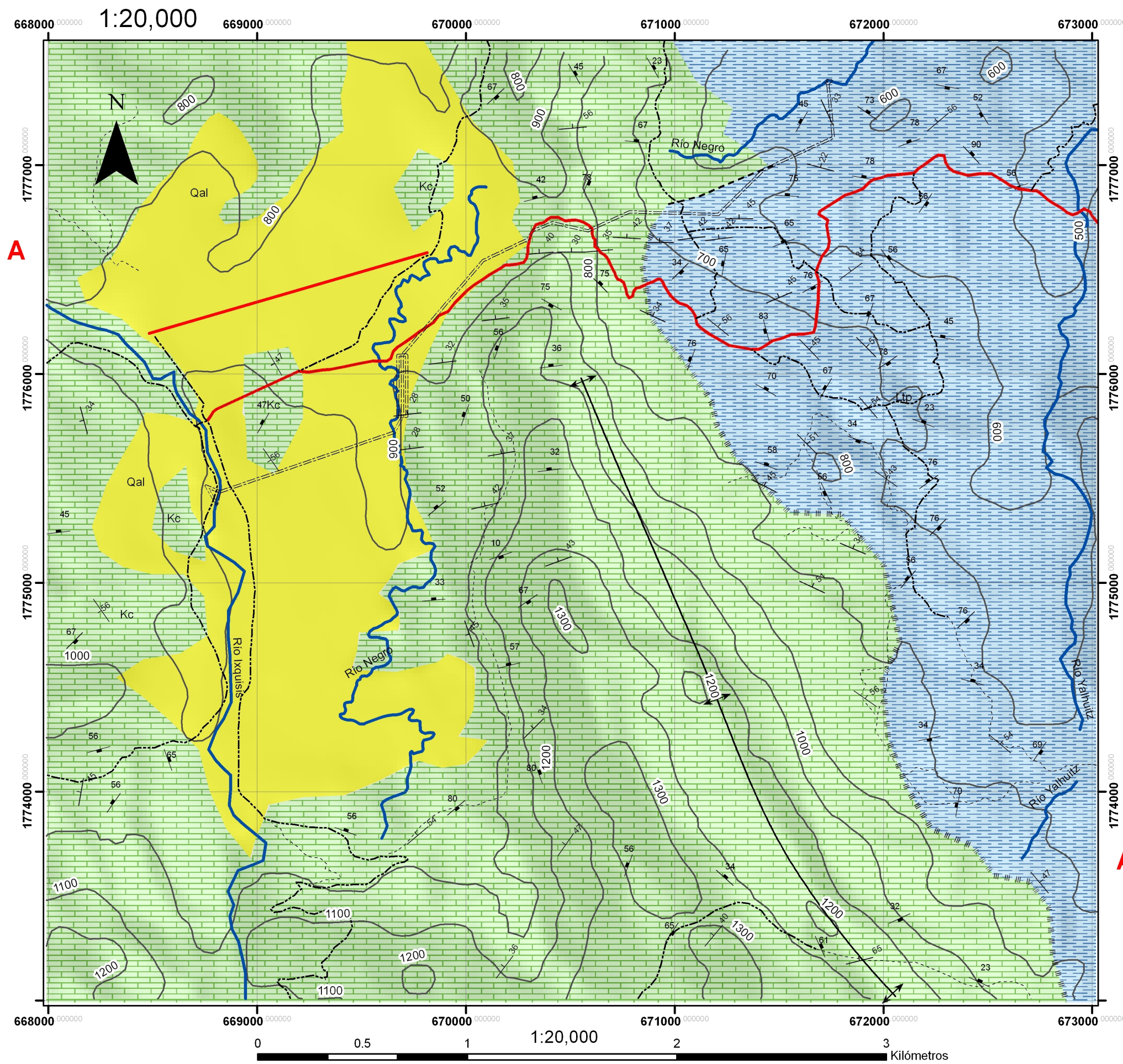


EG 13



EG 19





LEYENDA

GEOLOGÍA

Litotipo

- Unidad de Aluvión
- Unidad de Calizas
- Unidad de Lutitas

SÍMBOLOS GEOLÓGICOS

- RUMBO Y BUZAMIENTO DE ESTRATOS
- RUMBO Y BUZAMIENTO DE FRACTURAS
- EJE DE ANTIFORME

CONTACTOS LITOLÓGICOS

TIPO

- Concordante
- Discordante

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- ESTRUCTURAS POJOM
- PISTA DE ATERRIZAJE

VÍAS

TIPO

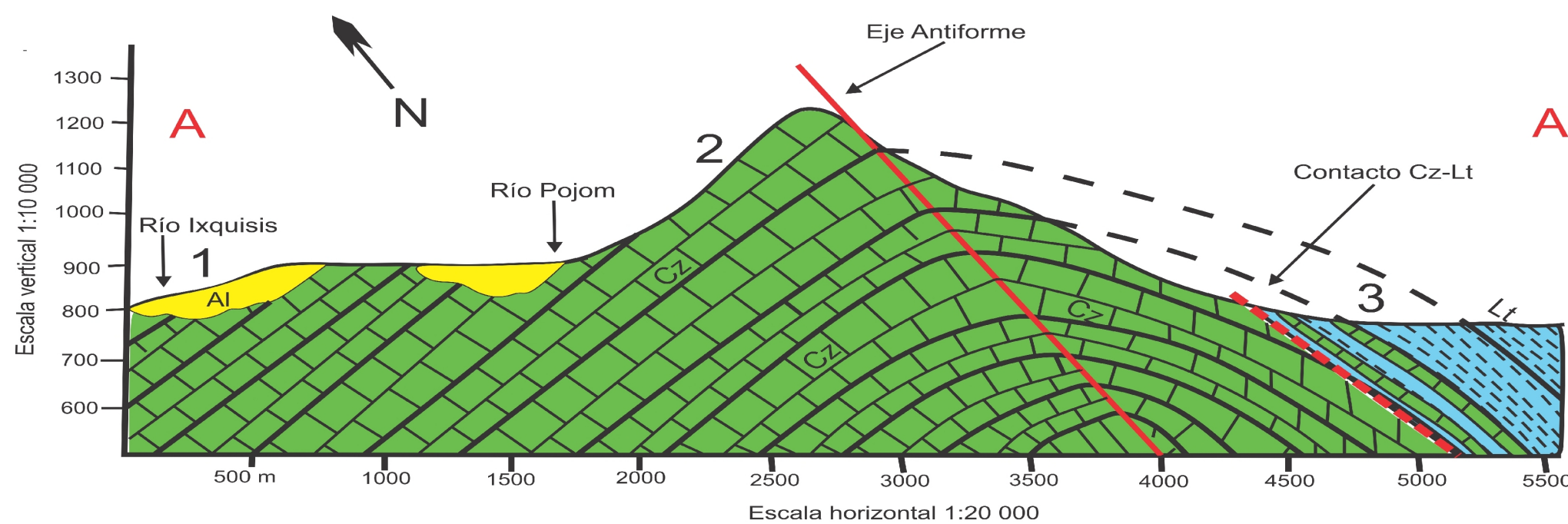
- FTN
- Terracería
- Vereda

RÍOS

Nombre

- Río Ixquis
- Río Negro
- Río Yalhuitz

PERFIL GEOLÓGICO A-A'



- | | |
|---|--|
| <p>Geología</p> <ul style="list-style-type: none"> Unidad de Aluvión Unidad de Calizas Unidad de Lutitas | <p>Símbolos convencionales</p> <ul style="list-style-type: none"> Eje antiforme Contacto litológico <p>1 2 3 Columnas estratigráficas generalizadas</p> |
|---|--|

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE -CUNOR-
CARRERA DE GEOLOGÍA

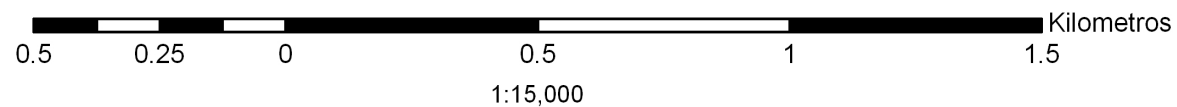
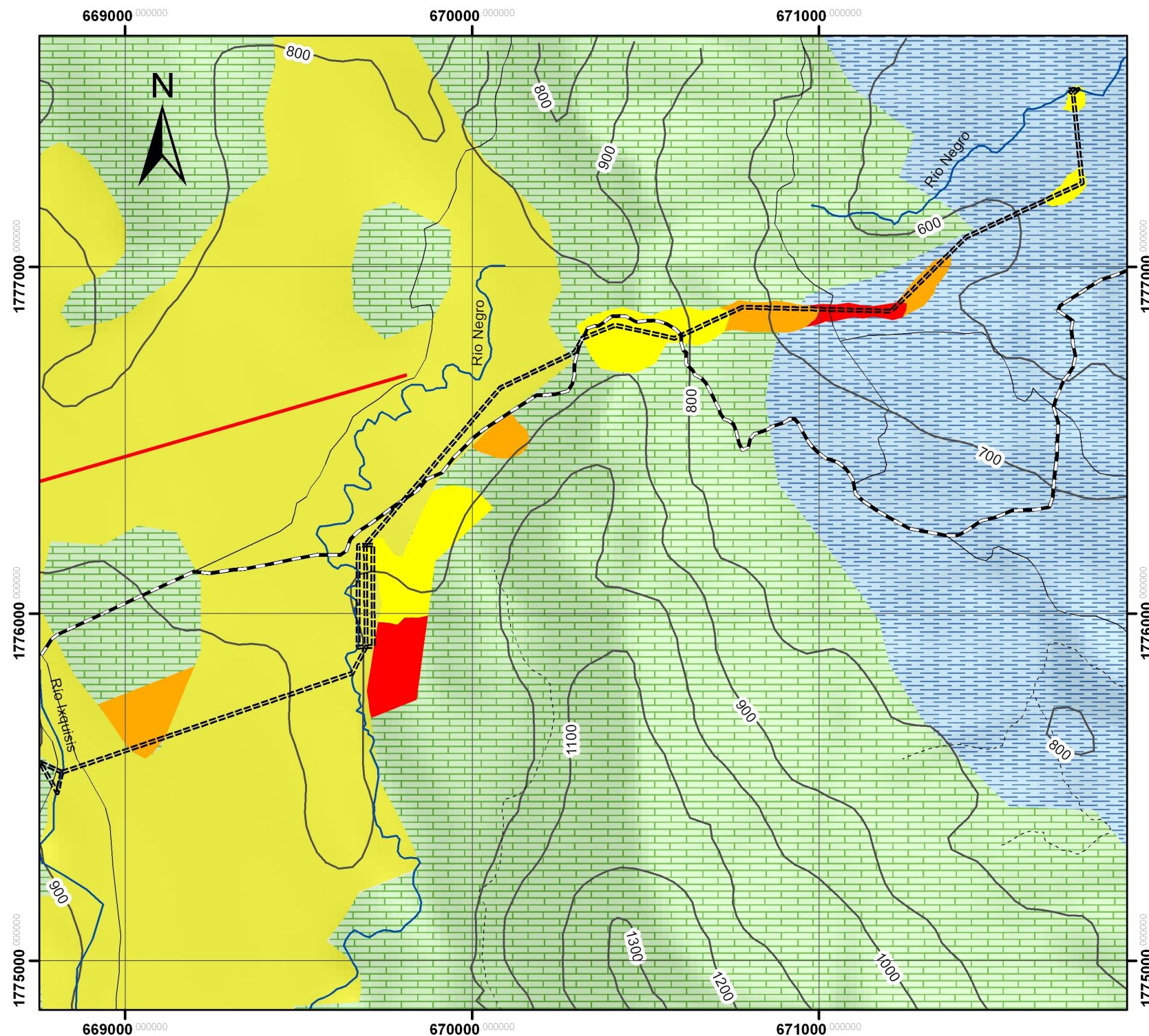
Análisis de macizos rocosos previo al diseño y construcción
del proyecto hidroeléctrico El Pojom, Huehuetenango

Contiene:

ANEXO IX

MAPA GEOLÓGICO DEL PROYECTO
HIDROELÉCTRICO EL POJOM





SIMBOLOGÍA

- PISTA DE ATERRIZAJE
- ESTRUCTURAS POJOM
- VÍAS
- TIPO
- FTN
- Terracería
- Vereda
- RÍOS
- Nombre
- Río Ixquisis
- Río Negro
- Río Yalhuitz

LEYENDA

CARACTERIZACIÓN RMR

RMR

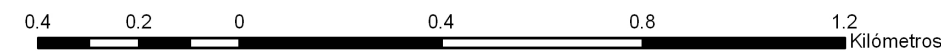
- MEDIA
- MALO
- MUY MALO

GEOLOGÍA

Litotipo

- Unidad de Aluvión
- Unidad de Calizas
- Unidad de Lutitas

Referencia espacial:
Escala 1:15 000
Proyección Universal de Mercator
Datum WGS 84, zona 15 N



CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD RMR

CALIDAD RMR	CLASE	PUNTUACIÓN
MEDIA	III	41-60
MALO	IV	21-40
MUY MALO	V	< 21

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE -CUNOR-
CARRERA DE GEOLOGÍA

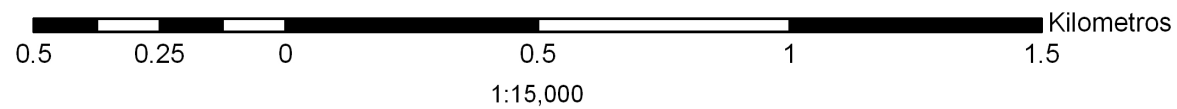
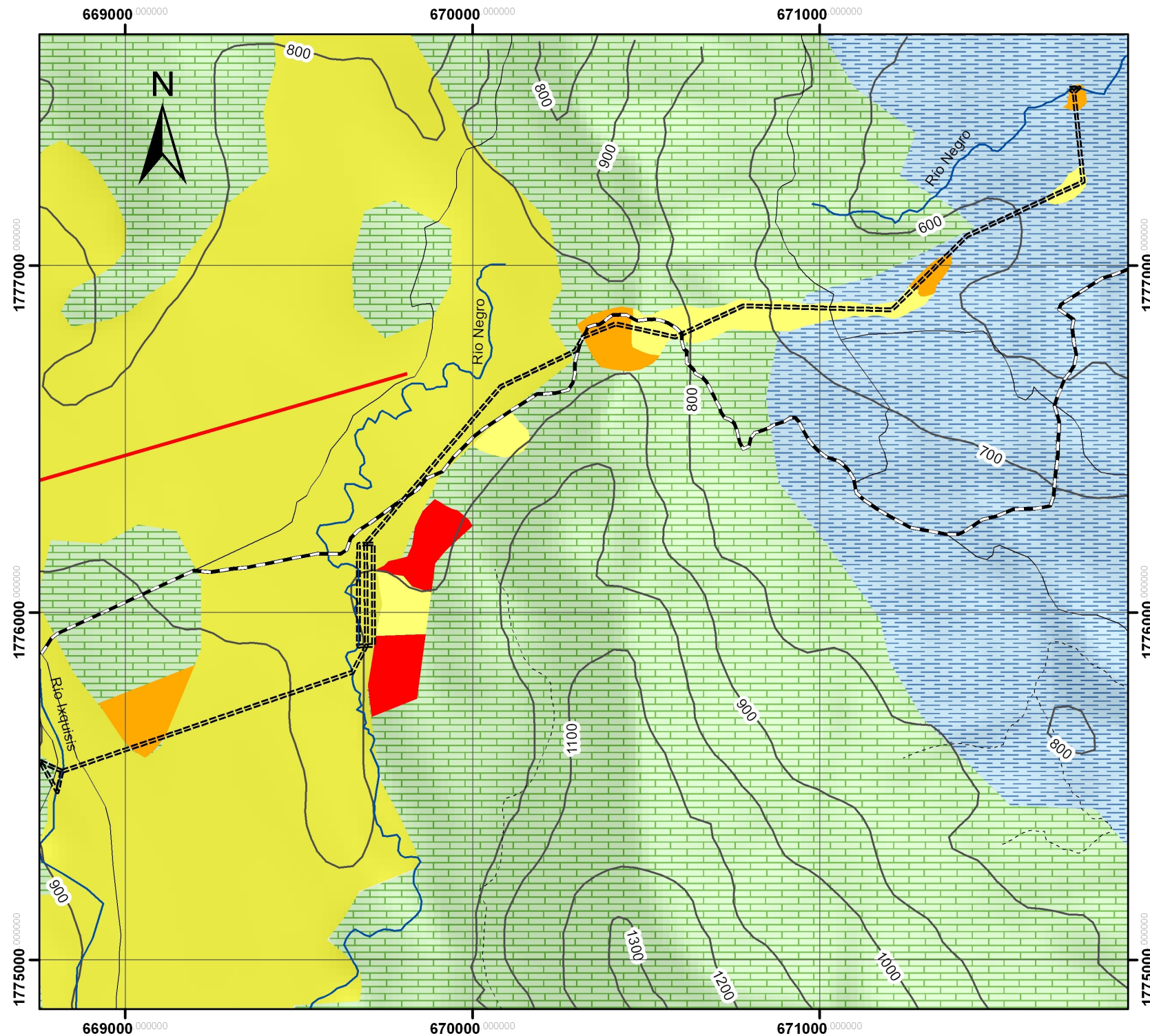
Análisis de macizos rocosos previo al diseño y construcción del proyecto hidroeléctrico El Pojom, Huehuetenango.

Contiene:

ANEXO X

MAPA DE LA CLASIFICACIÓN
RMR





SIMBOLOGÍA

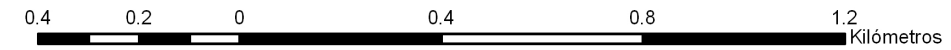
- PISTA DE ATERRIZAJE
- ESTRUCTURAS POJOM
- VÍAS
- TIPO
- FTN
- Terracería
- Vereda
- RÍOS
- Nombre
- Río Ixquis
- Río Negro
- Río Yalhuitz

LEYENDA

CARACTERIZACIÓN SMR

- SMR**
- NORMAL
 - MALA
 - MUY MALA
- GEOLOGÍA**
- Litotipo
- Unidad de Aluvión
 - Unidad de Calizas
 - Unidad de Lutitas

Referencia espacial:
Escala 1:15 000
Proyección Universal de Mercator
Datum WGS 84, zona 15 N



CLASIFICACIÓN ÍNDICE DE CALIDAD SMR		
CALIDAD SMR	CLASE	PUNTUACIÓN
NORMAL	III	41-60
MALA	IV	21-40
MUY MALA	V	< 21

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE -CUNOR-
CARRERA DE GEOLOGÍA

Análisis de macizos rocosos previo al diseño y construcción
del proyecto hidroeléctrico El Pojom, Huehuetenango.

Contiene:

ANEXO XI

MAPA DE LA CLASIFICACIÓN
SMR



No. 031-2017

**USAC
CUNOR**

Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro Universitario del Norte



El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer los dictámenes de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

INGENIERO GEOLOGO

Al trabajo titulado:

ANALISIS DE MACIZOS ROCOSOS PREVIO AL DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROYECTO HIDROELECTRICO EL POJOM, HUEHUETENANGO

Presentado por el (la) estudiante:

MARIO BERNARDO DAETZ ESCALANTE

Autoriza el

IMPRIMASE

Cobán, Alta Verapaz 22 de Febrero de 2017.

Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
DIRECTOR

