



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica

CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE ROCA CON EL MÉTODO SLOPE MASS
RATING (SMR) EN UN TRAMO DE LA RUTA CA-9, PARA LA IDENTIFICACIÓN
DE TALUDES INESTABLES Y HERRAMIENTA PARA ESTUDIO
DIAGNÓSTICO

Ing. Geo. Erick Noe Cacao Chiquin

Asesorado por el Msc. Ing. Geo. Bernie Gamaliel Castillo Moeschler

Guatemala, Mayo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE ROCA CON EL MÉTODO SLOPE MASS
RATING (SMR) EN UN TRAMO DE LA RUTA CA-9, PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE TALUDES INESTABLES Y HERRAMIENTA PARA
ESTUDIO DIAGNÓSTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. GEO. ERICK NOE CACAO CHIQUIN

ASESORADO POR EL MSC. ING. GEO. BERNNIE GAMALIEL CASTILLO
MOESCHLER

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, MAYO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gomez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	MSc. Ing. Julio Roberto Luna Aroche
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE ROCA CON EL MÉTODO SLOPE MASS RATING (SMR) EN UN TRAMO DE LA RUTA CA-9, PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TALUDES INESTABLES Y HERRAMIENTA PARA ESTUDIO DIAGNÓSTICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de postgrado de la facultad de Ingeniería, con fecha 25 de Enero de 2014.



Ing. Geol. Erick Noe Cacao Chiquin



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-001

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica titulado: **"CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE ROCA CON EL MÉTODO SLOPE MASS RATING (SMR) EN UN TRAMO DE LA RUTA CA-9, PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TALUDES INESTABLES Y HERRAMIENTA PARA ESTUDIO DIAGNÓSTICO "** presentado por el Ingeniero Geólogo Erick Noe Cacao Chiquin, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, marzo de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Doctorado: Cambio Climático y Sostenibilidad. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-001

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Tesis titulado **"CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE ROCA CON EL MÉTODO SLOPE MASS RATING (SMR) EN UN TRAMO DE LA RUTA CA-9, PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TALUDES INESTABLES Y HERRAMIENTA PARA ESTUDIO DIAGNÓSTICO"** presentado por el Ingeniero Geólogo Erick Noe Cacao Chiquin, correspondiente al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora a.i.

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, marzo de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Doctorado: Cambio Climático y Sostenibilidad. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y dencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-001

Como Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica del Trabajo de Tesis titulado **"CLASIFICACIÓN DE CALIDAD DE ROCA CON EL MÉTODO SLOPE MASS RATING (SMR) EN UN TRAMO DE LA RUTA CA-9, PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TALUDES INESTABLES Y HERRAMIENTA PARA ESTUDIO DIAGNÓSTICO"** presentado por el Ingeniero Geólogo Erick Noe Cacao Chiquin, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, marzo de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Doctorado: Cambio Climático y Sostenibilidad. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi principal formadora.

**Mi madre, Irma Yolanda
Chiquin Chávez**

Por ser el principal pilar de cada fase de mis estudios.

**Mi abuela, Alejandra
Chávez Reyes†**

Por ser una de las educadoras iniciales en el recorrido interminable del aprendizaje.

Mi familia

Por su comprensión y apoyo, además ayudar en lo posible para el desarrollo de mis proyectos.

**Mis profesores, asesor y
revisores**

Por su valioso apoyo y tiempo invertido en la corrección, revisión y aclaración de dudas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. GEOLOGÍA Y GEOTECTÓNICA REGIONAL.....	1
1.1. Ubicación del área de la investigación.....	1
1.2. Geología regional.....	2
1.2.1. Bloque Maya.....	3
1.2.2. Bloque Chortís	5
1.3. Ambiente geotectónico de Guatemala	8
1.4. Ambiente geotectónico de la zona	10
2. ÍNDICES DE CALIDAD DE ROCA.....	11
2.1. Introducción	11
2.2. Índice RMR	11
2.3. Índice SMR	13
2.4. Índice GSI	16
2.5. Propiedades geotécnicas para la clasificación:.....	17
2.5.1.RQD Rock Quality Designation.....	17

2.5.2.	Jn número de familias de discontinuidad.....	18
2.5.3.	Jr rugosidad de las juntas.....	19
2.5.4.	Ja alteración de las juntas.....	20
2.5.5.	Jw factor asociado al agua en juntas.....	20
2.5.6.	SRF factor de reducción por esfuerzo.....	21
2.5.7.	Resistencia de la roca sana.....	21
2.5.8.	Separación de los planos.....	22
2.5.9.	Orientación de los planos.....	22
2.6.	Mecanismos de rotura en macizos rocosos.....	23
3.	GEOLOGÍA LOCAL.....	27
3.1.	Unidades geológicas locales.....	27
3.1.1.	Depósitos pomáceos y Vulcano-sedimentarios.....	27
3.1.2.	Flujos basálticos.....	29
3.1.3.	Granitos.....	30
3.1.4.	Conglomerados y areniscas.....	31
3.1.5.	Esquistos cuarzo feldespáticos con clorita.....	32
3.2.	Alteración geológica en las rocas.....	33
3.3.	Geología estructural local.....	35
3.3.1.	Estructuras geológicas presentes.....	35
3.3.1.1.	Estratificaciones.....	35
3.3.1.2.	Foliaciones.....	37
3.3.1.3.	Contactos.....	39
3.3.1.4.	Fallas.....	41
3.3.1.5.	Discontinuidades.....	42
3.3.2.	Estadística estructural.....	42
3.3.2.1.	Rosetas.....	43
3.3.2.2.	Estereogramas.....	44
3.3.3.	Dominios estructurales.....	46

3.3.4. Análisis de estabilidad de taludes por geología estructural	48
3.3.5. Ángulo de fricción	48
3.3.6. Análisis de rotura	49
4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS LOCALES.....	55
4.1. Propiedades geotécnicas para la clasificación.....	55
4.1.1. Mapa de tipo de roca	55
4.1.2. Resistencia	56
4.1.3. RQD	59
4.1.4. Espaciamiento de las discontinuidades	61
4.1.5. Estado de las discontinuidades.....	62
4.1.6. Flujo de agua en las juntas	64
4.1.7. Valoración RMR	65
4.2. Correcciones para obtención de SMR	66
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN.....	71
5.1. Análisis estructural.....	71
5.2. Análisis litológico.....	75
5.3. Relación entre propiedades geológicas y geotécnicas	77
5.4. Mapa de calidad de roca.....	78
5.5. Ángulos de corte recomendados	80
5.6. Estabilización de taludes	83
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES.....	89

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS.....	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ambiente tectónico regional y ubicación de área de estudio.	2
2.	Columna estratigráfica del Bloque Maya Sur	5
3.	Columna estratigráfica del bloque Chortís	8
4.	Parámetros para obtención de RMR.....	12
5.	RMR y su relación con otros parámetros.	13
6.	Factores de ajuste para el cálculo del índice SMR.	15
7.	Geological Strength Index.....	16
8.	Esquematación de procedimiento para la obtención del RQD.	18
9.	Perfiles de rugosidad	20
10.	Modos de rotura comunes y su representación estereográfica.....	24
11.	Depósitos piroclásticos, estación 1-4.....	28
12.	Flujos de basalto, estación 1-2.	29
13.	Granito, estación 2-11.....	30
14.	Conglomerados y areniscas, estación 2-3.	31
15.	Esquistos cuarzo feldespáticos con clorita, estación 2-8.	32
16.	Fotografía de zona de falla.	34
17.	Estratificación métrica en conglomerados y areniscas.	36
18.	Foliación y plegamiento en unidad de esquistos.....	38
19.	Fotografías de contactos, estación 2-3 (A) y 2-7 (B).....	40
20.	Mapa de lineamientos	41
21.	Medición de datos de espaciamiento de estructuras.	42
22.	Diagramas de roseta, de rumbo.....	44
23.	Estereogramas de estructuras.....	45
24.	Estereogramas de estructuras totales.	47

25.	Medición de ángulo de fricción.	49
26.	Posible rotura planar en estación 1-4.	50
27.	Posible rotura en cuña, prueba de Marckland	51
28.	Falla posible por vuelco, estación 2-1.....	52
29.	Mapa geológico.	56
30.	Pruebas realizadas para determinación de resistencia.	57
31.	Datos de resistencia y correlación.	58
32.	Mapa de resultados de resistencia tras la valoración.	59
33.	Obtención de datos RQD.....	60
34.	Valoración RQD.....	61
35.	Valoración del espaciamiento de discontinuidades	62
36.	Valoración del espaciamiento de discontinuidades.	63
37.	Valoración del flujo de agua en las juntas.	64
38.	Valoración RMR.	66
39.	Valoración SMR.....	70
40.	Taludes inestables.....	72
41.	Valoraciones RMR y SMR.	79
42.	Orientaciones de talud inestables.....	82
43.	Ejemplos de soluciones de estabilidad.	85

TABLAS

I.	Resumen posibles roturas.....	53
II.	Valoración RMR	65
III.	Valoración de parámetros SMR.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C:	Cohesión, propiedad geotécnica de los materiales
φ :	Ángulo de fricción, propiedad geotécnica de los materiales
Mpa:	Mega pascales (unidad de presión, en el sistema internacional de medidas).
β_j :	Buzamientos de los planos de discontinuidad.
β_s :	Buzamientos de los planos del talud.
α_j :	Es el rumbo de la junta.
α_s :	Es el rumbo del talud
sigci:	<i>Uniaxial compressive strength</i> , resistencia compresiva uniaxial, parámetro GSI.
Mi:	<i>Material constant of the intact rock</i> , constante del material de la roca intacta, parámetro GSI.
D:	<i>Disturbance factor</i> , factor de perturbación, parámetro del GSI.

GLOSARIO

- Ángulo de fricción:** Es el ángulo estable máximo posible antes del movimiento un material.
- Cinemática:** Parte de la mecánica que trata del estudio del movimiento.
- Diagrama de rosa:** También llamada roseta, gráfico geológico estadístico que muestra un histograma circular con la distribución de orientación de estructuras.
- Discontinuidad:** En el estudio de mecánica de rocas, es cualquier fractura, estratificación, falla, foliación o en general cualquier rasgo que interrumpa la continuidad del macizo rocoso o su homogeneidad.
- Estereograma:** Gráfico que muestra una representación de planos y polos utilizando la red estereográfica.
- GSI:** Índice geológico de resistencia "*Geological Strenght Index*", que evalúa la calidad de roca en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica y tamaño de bloques principalmente.

- Mecánica de rocas:** Ciencia teórica y aplicada al comportamiento mecánico de rocas y de macizos rocosos.
- Mecánica de suelos:** Ciencia teórica y aplicada al comportamiento mecánico de suelos.
- RMR:** Índice de calidad de roca "*Rock Mass Rating*"
- RQD:** Clasificación de calidad de roca, "*Rock Quality Designation*", que de manera general se refiere a la sumatoria de los fragmentos mayores de 10 cm en un metro de perforación.
- SMR:** Índice de calidad de roca "*Slope Mass Rating*", el cual tiene de base la clasificación RMR.
- Talud:** Cualquier superficie inclinada natural o artificial de suelo o roca.

RESUMEN

Guatemala es un país afectado por fallas y con gran variedad de tipos de roca. Existen zonas con desarrollo de suelo, pero varios de los taludes son dominados por roca, por lo que los métodos de análisis deben ser enfocados al análisis de estabilidad en macizo rocoso o al menos considerarlos para la correcta estabilización.

Los métodos planteados incluyen el análisis de las propiedades de los macizos y la descripción de las discontinuidades, el SMR es un método ajustado de RMR en el cual se considera la orientación de discontinuidades y la orientación del talud.

Se describieron varias propiedades y por medio de la elaboración de mapas se visualizó su distribución e identificó sus tendencias o agrupamientos. Se describieron cinco unidades litológicas, la que tiene menor calidad de roca y mayor densidad de discontinuidades es la unidad de esquistos, esto se puede visualizar en los diferentes mapas.

Por medio de los estereogramas se puede hacer un análisis integral de la población total de discontinuidades y analizar diferentes tipos de rotura en taludes de roca.

Después de la realización, el presente estudio se puede sugerir como herramienta guía, determinar el RMR, determinar el GSI y datos para la clasificación de Hoek-Brown y o analizar modos de falla en macizos rocosos por geología estructural.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Guatemala es un país afectado por fallas, las cuales pueden ser de diferentes escalas, pueden ser locales hasta llegar a ser límites de placas como las de Norte América y el Caribe. Además de lo anterior, existen zonas de alteración o metamorfismo de las rocas, lo cual acelera la meteorización y la pedogénesis, por lo anterior existen zonas con índices de calidad de roca baja.

La tectónica activa de Guatemala le hace tener una variedad de rocas, las cuales tienen diferentes propiedades físicas y químicas, lo cual genera que haya heterogeneidades en su clasificación geotécnica.

El desconocimiento en la calidad de roca en una vía de comunicación, genera: un mal diseño de carretera, un mal diseño de su talud y una forma inadecuada de estabilización. La importancia de una de las principales vías de comunicación es indiscutible, por lo que se debería asegurar su funcionamiento, y la prevención de accidentes de tránsito provocados por derrumbes.

Por lo anterior, se plantea la siguiente pregunta:

Utilizando los índices de calidad de roca, ¿Es estable la roca en los taludes de la carretera?

Como complemento se plantean las siguientes preguntas:

Si no son estables los taludes, ¿en qué lugares?

¿La distribución espacial de las propiedades de la roca tiene algún control o tendencia?

¿Hay alguna característica o conjunto de ellas, que indique zonas con taludes inestables?

OBJETIVOS

General

Determinar la calidad de roca en el tramo carretero Km. 25+200m a 36+300m de la vía CA-9, con el método Slope Mass Rating (SMR).

Específicos

- Describir la interrelación y la distribución de las propiedades de roca por medio de la elaboración de mapas multitemáticos de propiedades geológicas y geotécnicas, para la determinación de los lugares inestables.
- Explicar las discontinuidades en la roca por medio de métodos de geología estructural, principalmente con estereofalsillas, para determinar tendencias.
- Identificar y correlacionar las características dominantes en las zonas con baja calidad de roca, como método de predicción e identificación de nuevas zonas problemáticas en lo que se refiere a estabilidad de taludes.

HIPÓTESIS

Existe una combinación de propiedades naturales de roca, que genera inestabilidad en los taludes, identificando estas propiedades se podría establecer zonas propensas a tener baja calidad de roca para obras futuras. Aún los taludes con índices de calidad buenos pueden ser inestables localmente, debido a su diseño en relación a las estructuras geológicas. Con la información recabada se comprobará lo anterior.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

Para la realización de la investigación se realizaron los pasos que se describen en los siguientes párrafos.

La recopilación bibliográfica se refirió a analizar los antecedentes del tema y de la zona de estudio, entre los documentos recabados están tesis, artículos, libros, mapas y bases de datos de sistemas de información geográfica.

Los trabajos de medición de datos son principalmente el mapeo geológico y el mapeo geotécnico, los cuales son la descripción detallada de las características de rocas, además se tomaron muestras representativas de las unidades para determinación de resistencia.

Entre los datos adicionales que se tomaron esta la determinación del ángulo de fricción por medio de prueba de inclinación, también como descripción rápida se determinó el GSI.

La investigación se realizó con poco equipo especializado, entre los aparatos utilizados están: 1) la brújula, la cual se utilizó para la edición de planos de discontinuidad y orientación de taludes, 2) metro, por medio del cual se hicieron las mediciones de RQD y abertura de discontinuidades, 3) martillo de geólogo, con el cual se obtuvieron muestras y se hicieron descripciones de resistencia de roca, 4) Teléfono inteligente, el cual cubrió la necesidad de cámara y GPS, 5) martillo de Schmidt y aparato para ensayo de carga puntual, los cuales se utilizan para la determinación de la resistencia de la roca.

La etapa de gabinete se refiere a la generación de mapas, determinación de índices y análisis geológico estructural, para lo cual se utilizó el siguiente software: ArcGIS, Dips y Orient.

El análisis de resultados comprende la explicación de las correlaciones realizadas e identificadas. También incluye el análisis de la aplicabilidad de los métodos, así como las conclusiones y recomendaciones derivadas de la experiencia de la aplicación.

INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los resultados de la implementación de métodos de análisis de calidad de roca, para la identificación de taludes inestables. Se establecen las zonas propensas a rotura y se complementa el análisis por métodos de geología estructural.

Los índices de calidad de roca han sido desarrollados principalmente para minería; sin embargo, la metodología se puede aplicar a macizos rocosos con cualquier fin.

La construcción de una obra requiere conocimiento del entorno físico, se realizará para su correcto diseño y planificación. La presente investigación ayudó a determinar los aspectos a tomar en cuenta para realizar la construcción de manera más segura y más económica.

En el apartado de geología y geotectónica regional, se establecen las condiciones que han dado origen a la configuración actual de las rocas y los fenómenos que han afectado su calidad de roca.

En el capítulo de índices de calidad de roca, se establecen algunas metodologías que se utilizan para hacer la descripción, los parámetros necesarios y el razonamiento o justificación de la valoración.

Por medio de la descripción del capítulo tres se describen las unidades de roca presentes en la zona así como sus características. Entre otras, los tipos de contacto, fallas presentes y características geológicas. También se hace un

análisis de las estructuras presentes y los tipos de falla posibles, según la geometría, ángulo de fricción y orientación del talud.

En el capítulo propiedades geotécnicas locales, se describen los parámetros utilizados para la caracterización de los macizos rocosos en los taludes, y se presenta la información con la ayuda de mapas para la visualización y el análisis espacial de los parámetros descritos.

Por último, se analiza la información global y se producen los comentarios, conclusiones y recomendaciones; producto del análisis y de la experiencia adquirida.

1. GEOLOGÍA Y GEOTECTÓNICA REGIONAL

1.1. Ubicación del área de la investigación

La zona de estudio se ubica en las proximidades de la zona de falla del Motagua que es el límite de placas de Norte América y del Caribe (Donnelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990), Figura 1., la zona se encuentra fallada, la región comprende a grandes rasgos una secuencia sedimentaria con contactos fallados con rocas ígneas y sobreyacida con depósitos piroclásticos cuaternarios. El tramo bajo estudio es la carretera CA-9 entre los kilómetros 25+200m a 36+300m.

Figura 1. Ambiente tectónico regional y ubicación de área de estudio



Fuente: Modificado de (Donelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

1.2. Geología regional

Guatemala se encuentra en el límite de placas de Norte América y del Caribe, las placas a su vez se subdividen en bloques, que son zonas con límites un poco más difusos, al norte de la zona de falla del Motagua se encuentra el bloque Maya, el cual pertenece a la placa de Norte América, al sur de la zona de falla se encuentra el bloque Chortís, que pertenece a la placa del Caribe (Donelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990), Figura 1.

Se explica de forma general la geología regional para contextualizar la complejidad de la zona y la cantidad de unidades litológicas presentes.

1.2.1. Bloque Maya

El bloque Maya fue más estable relativamente en el tiempo geológico, las rocas más antiguas conocidas en su parte sur, lo que concierne a Guatemala son las pertenecientes al Complejo Chuacús (Ortega-Gutiérrez, y otros, 2004), las cuales son rocas metasedimentarias con una gradación en el nivel de metamorfismo.

Posteriormente, hay una secuencia metasedimentaria de menor grado metamórfico que el Complejo Chuacús llamada el Complejo San Gabriel lo que es la secuencia Salamá, que consisten en rocas metasedimentarias y metavolcánicas intruidas por el granito Rabinal (Ortega Obregon, 2005).

El grupo Santa Rosa se ubica sobre el Complejo San Gabriel, son sedimentos varios, la determinación de que sedimentos lo conforman está en discusión (Martens, 2010), pero en general son sedimentos que van desde conglomerados a areniscas, hay lutitas y calizas al tope de la secuencia (Donnelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

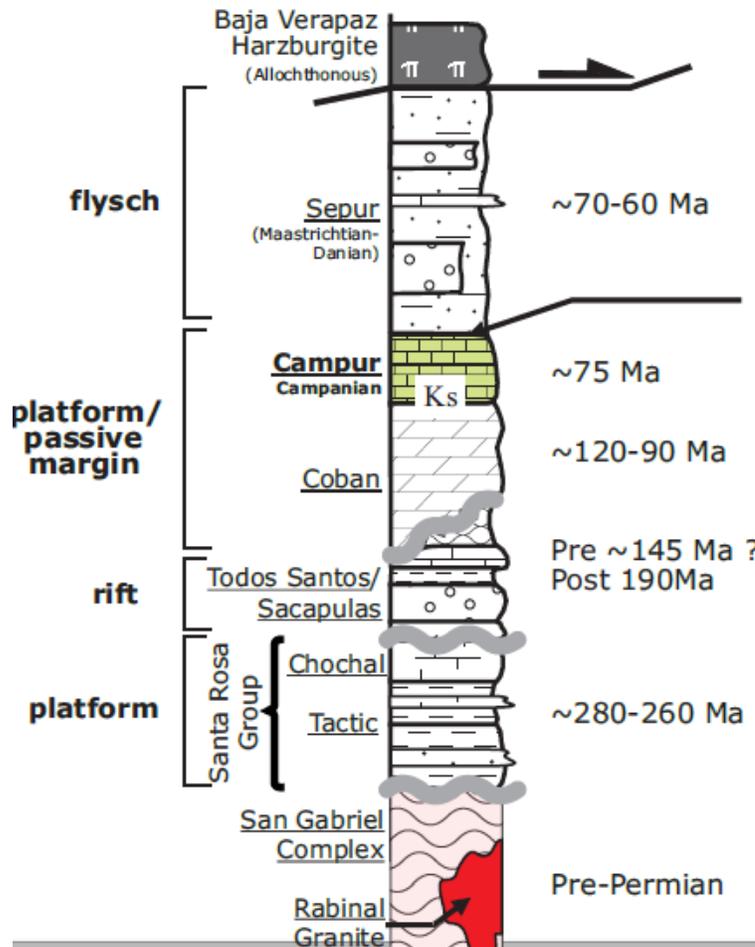
En las columnas estratigráficas clásicas del bloque Maya aparece seguidamente la formación Todos Santos que son conglomerados y areniscas, sobre esta está la formación Cobán, que son rocas sedimentarias, principalmente calizas (Donnelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

Al final hay depósitos sedimentarios tipo *flysch* que son típicas de playas o zonas costeras y ofiolitas provocadas por la colisión de las placas y la exhumación de las rocas de la corteza oceánica (Donnelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

En la figura 2, se muestra una columna estratigráfica del Bloque Maya Sur, según una de las interpretaciones más recientes, falta al final abajo el Complejo Chuacús, que según Martens en (Martens, 2010) podría ser únicamente el complejo San Gabriel metamorfoseado a una fase mayor.

En las columnas estratigráficas se muestran las unidades y las posibles relaciones de contacto entre ellas, también se observa si hay períodos sin registro geológico, por ejemplo: un tiempo en el que sedimentos no se depositaron sobre las rocas existentes. Lo anterior da indicios de las características actuales de los límites de roca, pues son zonas de discontinuidad mayor.

Figura 2. **Columna estratigráfica del Bloque Maya Sur**



Fuente: Tomado de (Martens, 2010).

1.2.2. Bloque Chortís

El bloque Chortís pertenece a la placa de Cocos, su límite norte es la zona de falla del Motagua (Figura 1) al sur oeste, es la fosa mesoamericana y al sur este probablemente hasta Costa Rica, el límite este es aún más problemático, siendo difuso (Donelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990). Las formaciones de este bloque tienen límites estratigráficos poco conocidos y es posible que se

trate de terrenos de distintos orígenes acumulados, es por eso que a continuación se tratarán las formaciones que están identificadas en las cercanías.

Complejo Las Ovejas, son gneises cuarzo-feldespáticos y esquistos de dos micas, mármol y anfibolita subordinados. Este complejo se encuentra plegado y fallado que se encuentra desde la parte central de Guatemala hasta Honduras (Pérez Bol, 1995). Filitas San Diego, son filitas cuarzo-micáceas con capas locales de cuarcita, el complejo Las Ovejas y las Filitas San Diego están intruidas por ígneos batolíticos.

Posterior en edad está el Grupo Honduras, que son sedimentos conglomeráticos a areniscas, con coloraciones rojizas a café, puede presentar capas calcáreas en el tope.

El Grupo Yojoa consiste en una secuencia calcárea, son cuatro formaciones: Formación Cantarranas, Formación Atima, Formación Guare y la Formación Ilima (Donnelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

El Grupo Valle de Ángeles se encuentra sobre el grupo calcáreo anterior y consiste en formaciones predominantemente clásticas.

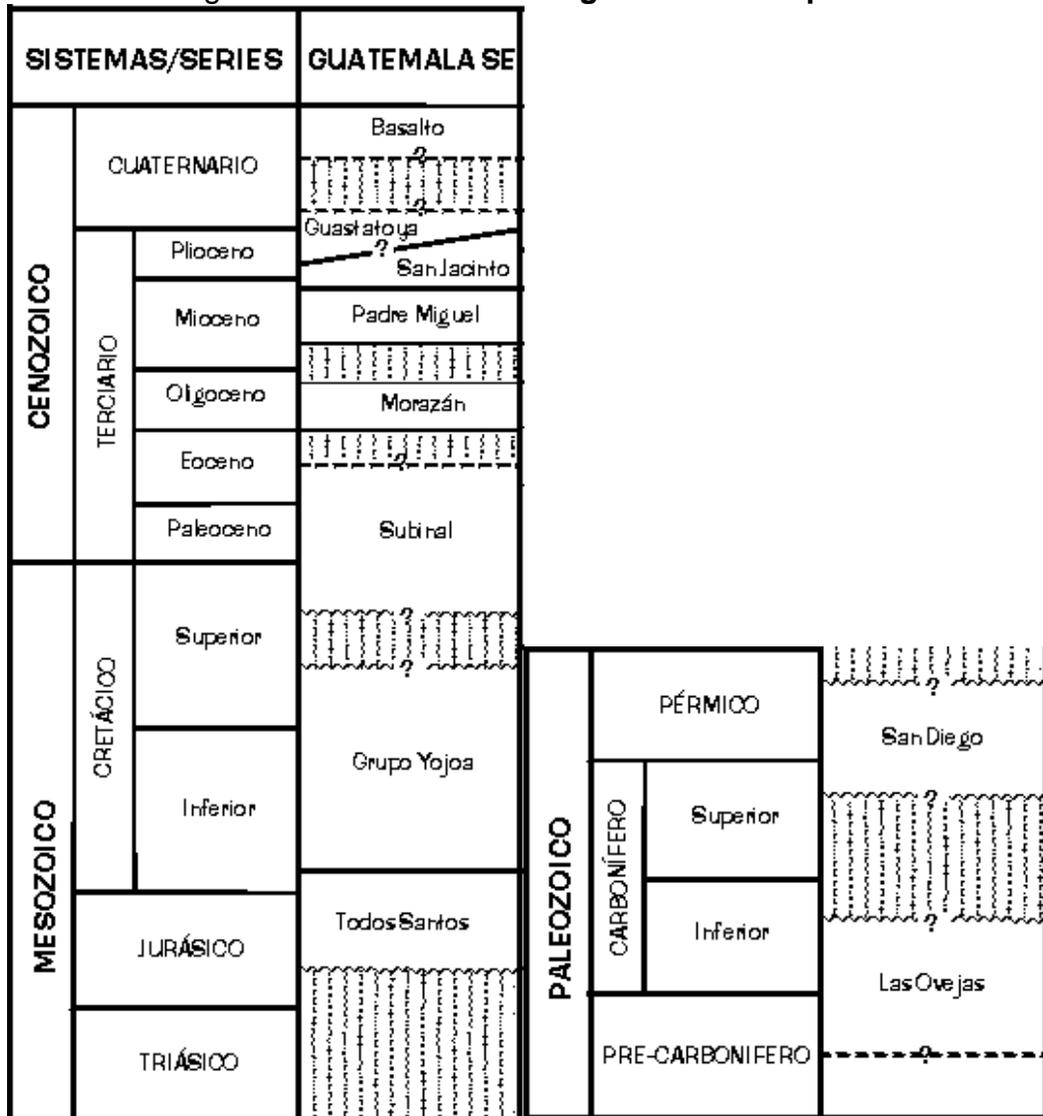
La formación Subinal es una secuencia sedimentaria de capas de conglomerados de cuarzo con fragmentos de rocas metamórficas e ígneas. Su coloración es rojiza a café. Se extiende en la zona de falla del Motagua, en este valle puede variar en composición pudiendo tener únicamente clastos de serpentinita y de fósiles. Adicionalmente tiene capas de limolitas (Donnelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

La Formación Guastatoya, son conglomerados de distintas composiciones, metamórficas e ígneas, contiene tobas y flujos de basalto. Se asocia a esta formación depósitos de diatomita y de ignimbritas (Pérez Bol, 1995).

El Grupo Padre Miguel comprende un grupo de flujos ignimbríticos que cubren la mayor parte de Guatemala sur y llegan hasta Nicaragua (Donnelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

A continuación una columna estratigráfica generalizada del bloque Chortís en la zona, donde se aprecian las diferentes edades y posiblemente una mayor afectación de fenómenos de alteración, debido a su largo tiempo de exposición, figura 3:

Figura 3. Columna estratigráfica del bloque Chortís



Fuente: Tomado de (Donelly, Horney, Finch, & López Ramos, 1990).

1.3. Ambiente geotectónico de Guatemala

El territorio guatemalteco fue deformado y fallado, debido a que se encuentra en un límite de placas, es por eso que: encontramos rocas de diferentes orígenes en contacto, se encuentran falladas en diferentes medidas,

existen sismos, debido a la subducción de placas (Placa del Caribe y de Cocos) y al límite transformante entre las placas (Placa del Caribe y Norte América) (Authemayou, y otros, 2011).

La tectónica de la región es la que ha dictado los rasgos fisiográficos que posee actualmente. En Guatemala existen sierras y valles que se han producido por las tensiones y presiones de la tectónica de placas, ejemplos de estas son las sierras del Chuacús y de las Minas, además de los Cuchumatanes.

Entre las depresiones que se encuentra está el valle del Motagua, los valles de Baja Verapaz y el lago de Izabal. Además existen gravens que son depresiones con límites fallados que son más pequeños y se encuentran en la zona de Chiquimula, Zacapa y Jalapa, principalmente.

Existen muchas fallas que se encuentran activas, las mayores son: 1) la zona de Subducción, 2) la zona de falla del Motagua y 3) la zona de falla del Polochic. Las anteriores tienen un desplazamiento medio de entre 8 y 18 mm/año (DeMets, y otros, 2000).

Las zonas de falla anteriores son a las que se les atribuye la mayoría de sismos registrados; sin embargo, hay zonas que son afectadas por el desplazamiento de fallas más locales, estas pueden fracturar y triturar la roca hasta convertirla en una zona arcillosa.

Durante la evolución del fallamiento se puede favorecer el paso de roca a suelo (limo y/o arcilla), debido a que esencialmente la roca disminuye su tamaño de grano, además que se favorece la meteorización al tener más área a la cual atacar mediante agentes químicos y físicos.

1.4. Ambiente geotectónico de la zona

La zona se encuentra al sur del valle del Motagua; al sur del límite de placas de Norte América y del Caribe, se encuentra en la placa del Caribe. Está a aproximadamente 14 Km del río Motagua, este río representa aproximadamente la ubicación de la zona de falla del Motagua.

Las rocas antiguas de la zona son posiblemente correlacionables al Complejo Las Ovejas (Pérez Bol, 1995), las cuales están falladas y pueden tener contactos fallados con otras rocas más jóvenes, los mapas geológicos próximos indican fallamiento inversos con buzamientos con inclinación al norte, hacia la zona de falla del Motagua, también muestran foliaciones con esta tendencia. Hay ejes de pliegue con tendencia este-oeste (Instituto Geográfico Nacional, 1980).

Los rasgos geológicos antes descritos revelan la compresión en sentido norte-sur que ha sufrido la zona, a pesar que actualmente el movimiento principal es de rumbo.

Fisiográficamente, la zona se encuentra en las tierras altas volcánicas, la cual es una región en la que ha habido flujos ígneos, además de caída de tefras (Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA)-Programa de Emergencia por Desastres Naturales (MAGA-BID), 2001). Lo anterior enmascara los rasgos anteriores a estas cubiertas.

Tener en cuenta el fallamiento de las rocas más antiguas y la cubierta de rocas más jóvenes y relativamente frescas, se tiene una condición de cobertura de roca fresca con roca más fallada abajo, que en algunas ocasiones podría ser problemática.

2. ÍNDICES DE CALIDAD DE ROCA

2.1. Introducción

A continuación se describe algunas de las metodologías más utilizadas para la clasificación de calidad de roca.

2.2. Índice RMR

El RMR (Rock Mass Rating) fue introducido por Bieniawski en 1976, inicialmente fue pensado para valorar la estabilidad de los soportes requeridos en túneles. El RMR permite la obtención de la cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ), con las siguientes funciones (Corodiminas, Hürlimann, & Doménech, 2013):

$$C = 5RMR(\text{KPa})$$

$$\phi = 5 + RMR/2 \text{ (deg)}$$

En este sistema, el índice RMR se obtiene como suma de cinco números que son a su vez función de:

- La resistencia a compresión simple de la roca matriz
- RQD
- Espaciamiento de las discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Condición del agua

El sistema RMR tiene una clasificación básica, que resulta de la suma de los parámetros anteriores y se utilizan tablas para su clasificación, tal es el caso

de la figura 4. Existe un ajuste en función de la orientación del túnel y las discontinuidades.

Figura 4. **Parámetros para obtención de RMR**

Parámetro			Rango de valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo puntual carga	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MP	< 1 MPa
	valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	valor		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
valor	6	5	3	1	0				
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	valor	15	10	7	4	0			

Fuente: (Corodiminas, Hürlimann, & Doménech, 2013, pág. 7).

La clasificación oscila entre 0 y 100, y los valores dan idea de las propiedades que se pueden tener de cohesión y ángulo de fricción (Figura 5).

Figura 5. **RMR y su relación con otros parámetros**

Clase	Calidad	RMR	Cohesión (kPa)	Angulo de fricción (°)
I	muy buena	81 – 100	> 400	> 45
II	buena	61 – 80	300 – 400	35 – 45
III	regular	41 – 60	200 – 300	25 – 35
IV	mala	21 – 40	100 – 200	15 – 25
V	muy mala	0 - 20	< 100	< 15

Fuente: (Corodiminas, Hürlimann, & Doménech, 2013, pág. 4).

2.3. Índice SMR

La clasificación SMR (Slope Mass Rating) es una modificación al RMR, la cual está en función de las características del talud, su valor se calcula partiendo del RMR original, modificándolo con ajustes en función de la orientación de las juntas y el método de excavación aplicado (Bañón Blázquez, 2010).

El ajuste en función de la orientación del talud se explica teniendo en cuenta que dependiendo de la orientación se puede tener o no, susceptibilidad a desplazarse, debido a las familias de discontinuidades, ejemplo de esto se observa en el apartado 2.6 y 5.5.

El SMR se define así:

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

Donde F1 depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas y la cara del talud. Empíricamente se ajustan a la expresión:

$$F1 = (1 - \text{SEN}(\alpha_j - \alpha_s))^2$$

Donde α_j es el rumbo de la junta y α_s es el rumbo del talud.

El dato F2 depende del buzamiento de las juntas (β_j) en la rotura plana (P)

$$F2 = \text{tg}^2\beta_j$$

En rotura por vuelco (T) el valor es constante 1.

El F3 es la relación entre los buzamientos de los planos de discontinuidad (β_j) y del talud (β_s).

$$F3 = \beta_j - \beta_s \text{ (Rotura plana)}$$

$$F3 = \beta_j + \beta_s \text{ (Rotura con vuelco)}$$

El F4 hace referencia a la influencia del método de excavación utilizado en la construcción del talud (Figura 6).

Figura 6. Factores de ajuste para el cálculo del índice SMR

F	VALORES		EVALUACIÓN GLOBAL				
			Muy Favorable	Favorable	Normal	Adverso	Muy Adverso
F ₁	P	$ \alpha_j - \alpha_s $	> 30°	30° a 20°	20° a 10°	10° a 5°	< 5°
	T	$ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
			0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
F ₂	P	$ \beta_j $	< 20°	20° a 30°	30° a 35°	35° a 45°	> 45°
	T	VALOR F₂	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
F ₃	P	$\beta_j - \beta_s$	> 10°	10° a 0°	0°	0° a -10°	< -10°
	T	$\beta_j + \beta_s$	< 110°	110° a 120°	> 120°	-	-
			0	6	25	50	60
MÉTODO DE EXCAVACIÓN DEL TALUD							
F ₄	Talud natural		Precorte	Voladura suave	Voladura o Mecánico	Voladura deficiente	
			+15	+10	+8	0	-8
LEYENDA: P corresponde al caso Rotura plana; T corresponde a Rotura por vuelco α_j es el rumbo o dirección de las juntas; α_s es la dirección del talud (slope) β_j es el buzamiento de las juntas; β_s es el buzamiento del talud							

Fuente: (Bañon Blázquez, 2010, pág. 15).

Tener en cuenta que el SMR es un ajuste en función de la orientación del talud y la orientación de familias de discontinuidades, para su realización se debe poseer el RMR y además un levantamiento de discontinuidades.

El levantamiento de discontinuidades se hace por estación o por talud, en él se incluyen todas las discontinuidades, fracturas, estratificaciones, foliaciones, fallas entre otros. Este levantamiento es la única información extra requerida para la realización del ajuste y obtención del SMR, para realizar los cálculos se debe involucrar el análisis estereográfico para determinar las familias de discontinuidades principales. En el apartado 2.5.9 se describen algunos parámetros para el registro de orientación de planos.

2.4. Índice GSI

El Geological Strength Index (GSI), se utiliza para rocas de mala calidad, y tiene la ventaja de ser utilizado, mediante observaciones geológicas de campo (Corodiminas, Hürlimann, & Doménech, 2013). El GSI se vale de las observaciones de las estructuras y de las condiciones de superficie, según la figura siguiente:

Figura 7. **Geological Strength Index**

Rock Type: General		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70	60		
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Fuente: (Corodiminas, Hürlimann, & Doménech, 2013, pág. 15).

Esta clasificación es más utilizada cuando la roca presenta las discontinuidades de manera aleatoria o si no hay un patrón definido, se pueden hacer estimaciones de las propiedades mecánicas con este método (Marinos & Hoek, 2009).

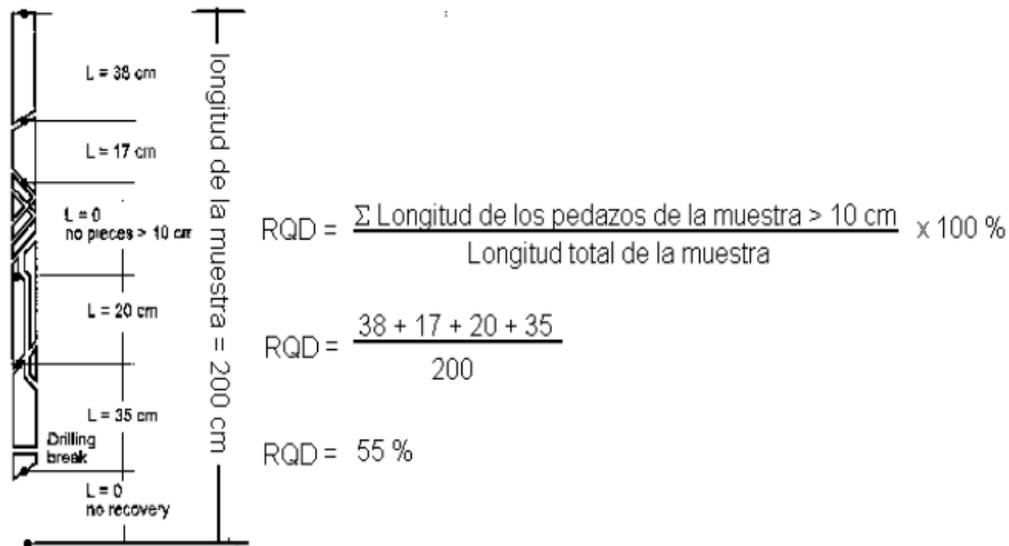
2.5. Propiedades geotécnicas para la clasificación:

A continuación se describen algunos de los datos que se obtienen de los levantamientos de campo y que se utilizan para la clasificación.

2.5.1. RQD Rock Quality Designation

El Rock Quality Designation (RQD) fue desarrollado por Deere en 1967, según Hoek (Hoek, 2007), es un estimado cualitativo de la calidad de roca en testigos de sondeo, es definido como el porcentaje de fragmentos de núcleo mayores o iguales a 10 cm, en una longitud del núcleo. El núcleo debe ser al menos de 57.4mm. El RQD depende indirectamente del número de fracturas y del grado de la alteración del macizo rocoso, en la figura 2.5, se observa el procedimiento para la obtención en núcleo de perforación.

Figura 8. **Esquematación de procedimiento para la obtención del RQD**



Fuente: (CASTEM, 2013, pág. 26)

Una consideración que se hace con este método es que la barrenación puede favorecer la calidad de roca por medio de la orientación y el rumbo de las fracturas (Cosillo Pinto, 1999). Además de la forma tradicional de obtener el RQD, se puede obtener indirectamente haciendo la medición de fracturas en un afloramiento en un área determinada.

2.5.2. Jn número de familias de discontinuidad

Cuando un grupo de fracturas tiene la misma inclinación y rumbo, ese grupo es llamado una familia de fracturas. En algunos casos existen muchas familias, entre más alto el número Jn indica mayor cantidad de familias y una roca más débil (Rajapakse, 2008).

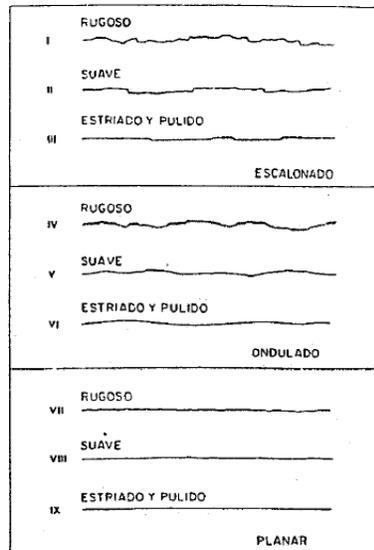
2.5.3. Jr rugosidad de las juntas

Cuando las fracturas están sujetas a esfuerzos, las fracturas con rugosidad suave se deslizan y fallan antes que las fracturas rugosas. Es por esta razón que la rugosidad juega un papel importante en la estabilidad de rocas (Rajapakse, 2008).

El desplazamiento ocurre en fracturas con rugosidad suave a menores cargas. Dependiendo de la escala existen dos órdenes para clasificarlas. Las rugosidades mayores son llamadas ondulaciones y las pequeñas son asperezas, las primeras afectan las características del movimiento y las otras la resistencia al corte (Cosillo Pinto, 1999).

Existen varios métodos para obtener el número, algunos son muy elaborados y requieren detalle para hacer perfiles de rugosidad, también se pueden utilizar herramientas para hacer un grabado del perfil del afloramiento. En este caso se utilizó un método descriptivo, el cual se vale de tablas y figuras para hacer la clasificación, es un método recomendado cuando se analizan varios afloramientos (Figura 9).

Figura 9. **Perfiles de rugosidad**



Fuente: (Cosillo Pinto, 1999)

2.5.4. Ja alteración de las juntas

Las fracturas son alteradas en el tiempo, son alteradas desde el material que está dentro de ellas. En algunos casos, el material que los rellena también puede cementar las juntas firmemente. En otros casos el material de relleno puede generar una superficie resbaladiza. La descripción se realiza utilizando tablas.

2.5.5. Jw factor asociado al agua en juntas

Este parámetro es una medida del agua en las fracturas. Este dato no puede ser obtenido de roca sepultada, por ejemplo un túnel debe ser construido para obtener este dato, y en este caso no se debería de obtener de testigos. Algo que

se realiza es obtener el dato de la misma formación de roca y aplicarlo al sitio de estudio.

2.5.6. SRF factor de reducción por esfuerzo

Este factor es un indicador de zonas de roca débiles en una formación. Una zona débil es una región en una formación de roca con RQD bajo, las zonas débiles pueden tener roca meteorizada o una variación en tipo de roca. La clasificación se realiza por medio de tablas.

2.5.7. Resistencia de la roca sana

Es un dato utilizado para la determinación del RMR, se establece mediante ensayos de carga puntual y compresión uniaxial, además se puede utilizar el martillo de schmidt y en casos extremos tablas o criterios relacionados al GSI (Geological strength index), el cual es un índice de calidad de roca.

En este estudio, se utilizó el ensayo de carga puntual, el martillo de schmidt y tablas, para determinar el valor.

Las tablas son valores de referencia que se utilizan para contrastar los resultados y que estén en el rango permisible.

La prueba de rebote con el martillo de schmidt (Figura 4.2 A) se realiza en varias ocasiones registrando la orientación del martillo y la lectura de rebote, para luego interpretar el promedio del rebote y obtener la resistencia de la roca.

El ensayo de carga puntual se utiliza de la forma observada en la figura 4.2 B, en esta prueba se utiliza un fragmento de roca, el cual puede o no ser cortado

de varias formas. En general, se le aplica esfuerzo por medio de dos puntas cónicas y se realizan algunas correcciones en función de la forma de la muestra para luego estimar la resistencia.

2.5.8. Separación de los planos

Hace referencia a la longitud entre discontinuidades, controla el tamaño de bloques individuales de roca intacta. En general, si hay muchas discontinuidades cambian las propiedades del macizo rocoso volviéndolo parecido a una masa de suelo, aumentando también la cantidad de agua que puede infiltrársele.

2.5.9. Orientación de los planos

La orientación de los planos de discontinuidad es importante para la determinación de la rotura por vuelco o planar, desde el punto de vista de la clasificación SMR. La orientación de los planos se obtiene mediante la utilización de una brújula (Figura 3.15) con la cual se registrarán los datos de orientación y de inclinación del plano, esto junto a la ubicación por medio de coordenadas permitirá el análisis estadístico por estación.

Se eligió determinar las orientaciones de los planos, por medio del sistema de dirección de inclinación y buzamiento, pues este permite un registro rápido y un análisis más accesible.

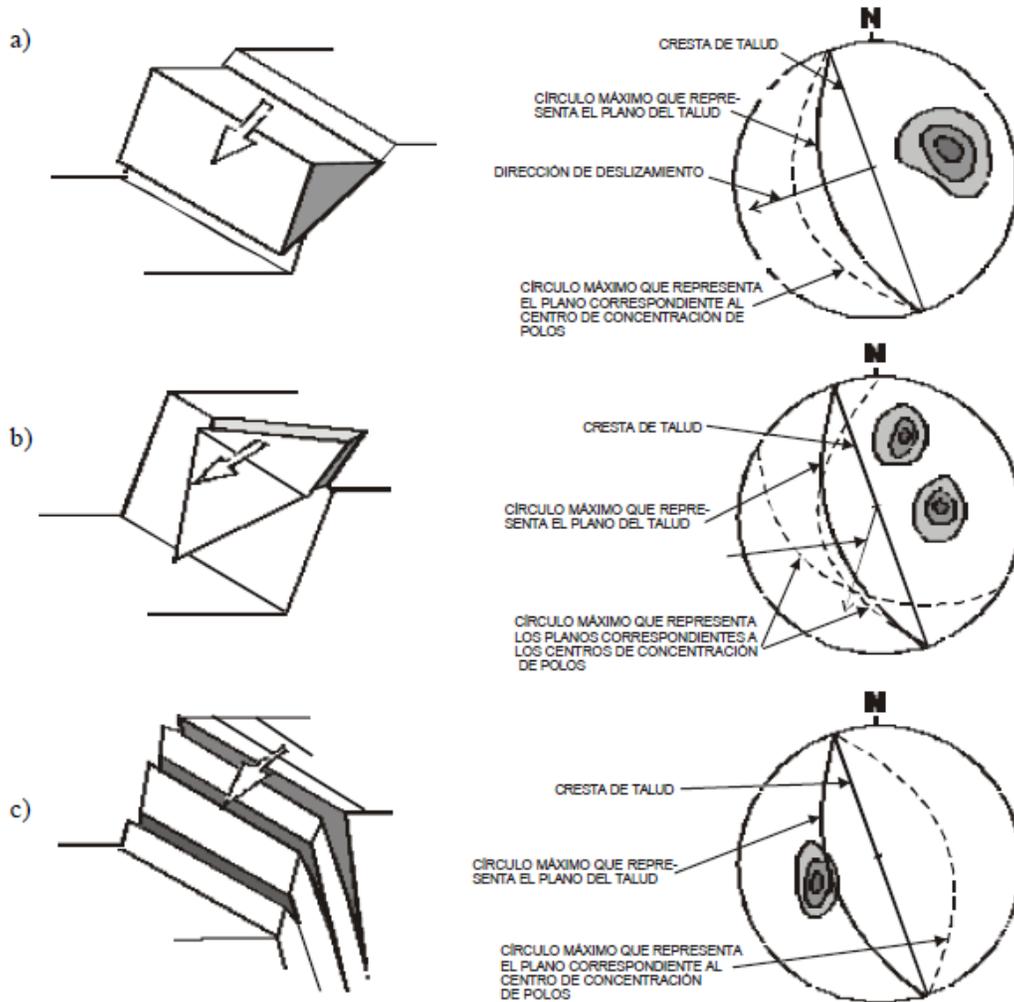
Una vez seleccionada la forma de agrupación por ejemplo, por estación o por tipo de roca se pueden determinar las familias de discontinuidades por medio de un gráfico de densidades de polos en el apartado 3.3.2 se observan los gráficos generados para el entendimiento de las orientaciones, allí también se utilizan rosetas que son histogramas circulares de orientaciones.

2.6. Mecanismos de rotura en macizos rocosos

Se plantea el análisis de rotura por medio de análisis cinemático, el cual establece en qué condiciones puede fallar el talud. Para realizar estos análisis se hace uso de la red estereográfica.

Las representación estereográficas pueden ser complejas si se presentan todos los planos, es por eso que se realizan representaciones únicamente de los polos de los planos, realizando diagramas de densidad de polos para establecer las familias o grupos dominantes de discontinuidades, ejemplo de estos diagramas de densidad se muestran del lado derecho de la figura 10.

Figura 10. **Modos de rotura comunes y su representación estereográfica**



Fuente: (Tomás Jover, Ferreiro Prieto, Sentana Gadea, & Díaz Ivorra, 2002, pág. 7).

Mediante el estudio estructural de los taludes se pueden determinar posibles movimientos o tipos de falla. En taludes de roca los principales tipos de rotura son: planar, cuña y vuelco (Figura 10).

En la rotura plana se deben cumplir las siguientes condiciones, citadas por (Armas Zagoya, 2004):

El rumbo de la discontinuidad planar debe estar 20° dentro del rumbo de la cara del talud, en ambas direcciones.

El echado de la discontinuidad planar debe ser menor que el echado de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara.

El echado de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento.

La rotura tipo cuña se analiza con la prueba de Markland, en el cual se analiza si la intersección de los planos de cuña interceptan en el umbral de movimiento permitido por el ángulo de fricción y la inclinación del talud. Cumpliendo con las siguientes condiciones citadas por (Armas Zagoya, 2004):

El rumbo de la línea de intersección debe ser aproximadamente igual a la dirección del echado de la cara del talud (debe aflorar hacia la cara del talud).

La inmersión de la línea de intersección debe ser menor que el echado de la cara del talud. Bajo esta condición, se dice que la línea de intersección aflora en dirección hacia la cara del talud.

La inmersión de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción del o los planos de deslizamiento.

La falla por vuelco es menos común, pero se puede analizar siguiendo las siguientes condicionantes citadas por (Armas Zagoya, 2004):

El rumbo de las capas debe ser aproximadamente paralelo al del talud. Diferencias en estas orientaciones de entre 15° - 30° han sido citadas entre varios

autores, por consistencia, entre otros modelos de mecanismos de falla, un valor de 20° es apropiado, según (Armas Zagoya, 2004).

El echado de las capas debe tender hacia el interior del talud. El rumbo de la familia de discontinuidades y el rumbo del talud puede variar $\pm 20^\circ$.

En orden para que el deslizamiento intercapas ocurra, el polo del círculo máximo de la discontinuidad a volcarse debe tener una inmersión menor que la inclinación de la cara del talud menor que el ángulo de fricción.

3. GEOLOGÍA LOCAL

3.1. Unidades geológicas locales

A continuación se describen las unidades locales reconocidas en los afloramientos estudiados, se describen en orden cronológico, según las relaciones estratigráficas observadas, de las unidades más jóvenes a las más antiguas.

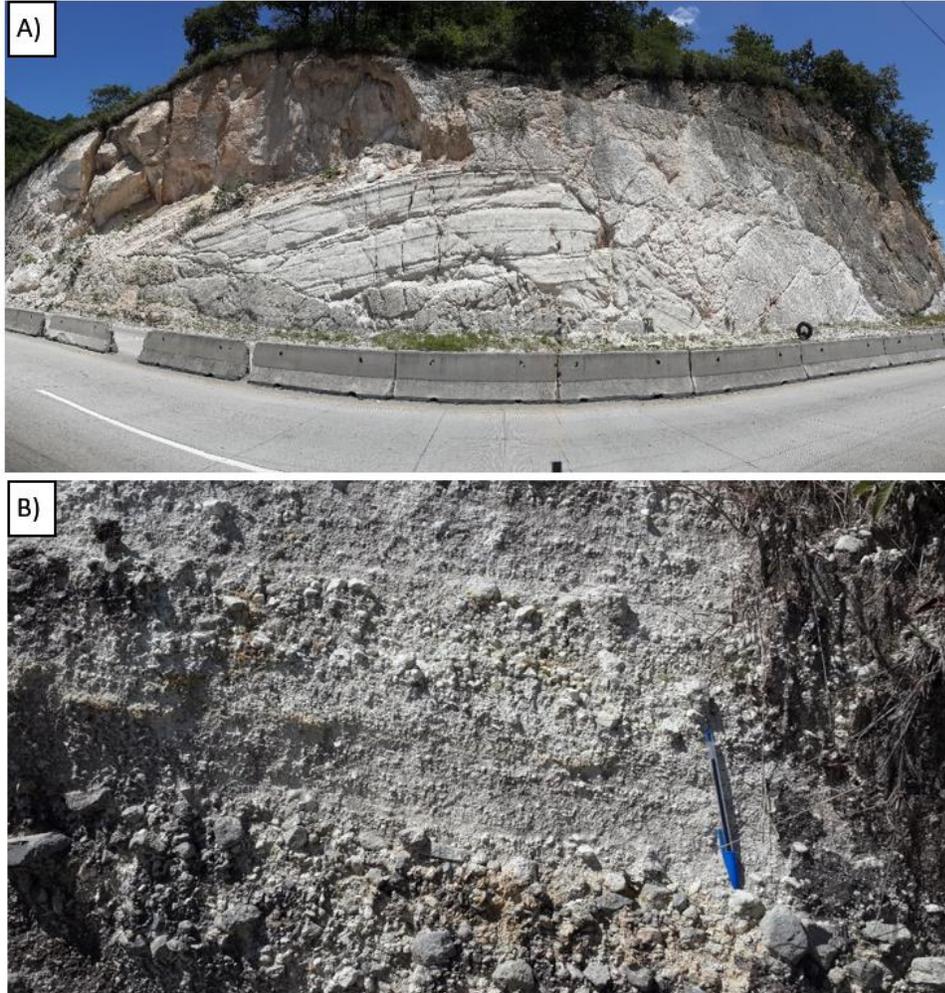
3.1.1. Depósitos pomáceos y vulcano-sedimentarios

Estos depósitos contienen materiales piroclásticos, algunas capas están depositadas directamente sobre la superficie final y otras presentan evidencia retrabajamiento y redepositación, tal es el caso de estratificación laminar. En general, estos depósitos no están consolidados y es relativamente fácil disgregarlos.

Los depósitos de caída se caracterizan por ser masivos y no poseer estratificación, además de poseer un tamaño de grano homogéneo (Figura 11).

Los depósitos retrabajados, pueden ser capas locales con estratificación separando depósitos de caída o flujos piroclásticos, el tamaño de grano varía y es mayor que los de caída, posee fragmentos de hasta algunos centímetros de diámetro (Figura 11B), la ubicación de las fotografías se indica por estación, las coordenadas específicas de cada estación se detallan en el Anexo 2.

Figura 11. **Depósitos piroclásticos, estación 1-4.**
A) Afloramiento, B) Detalle



Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Flujos basálticos

Son rocas de composición basáltica, en algunos casos forman superficies topográficas planas y en otros se encuentran cubiertos por rocas más recientes, pueden presentar formas heterogéneas. A escala de afloramiento pueden formar fragmentos tabulares o bloques, su espesor varía pues son flujos que cubrieron la paleosuperficie (figura 12), en los taludes analizados los espesores varían de 10m hasta los 30m.

Figura 12. **Flujos de basalto, estación 1-2.**
A) Afloramiento y B) detalle



Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Granitos

En la zona afloran rocas de composición acida, color claro a la vista. Además del cuarzo y feldespato se observaron biotita y anfíboles en menor cantidad. En general esta roca plutónica es cohesiva y resistente, aunque se presenta en bloques en los afloramientos observados, figura 13.

Figura 13. **Granito, estación 2-11.**
A) Afloramiento y B) Detalle



Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Conglomerados y areniscas

Este paquete sedimentario es dominado por conglomerados y areniscas, hay lutitas en menor cantidad (Figura 14). La composición varía dependiendo del material que se encontraba en la cuenca de depositación original. En la zona dominan los clastos volcánicos, según mediciones hechas en otros estudios, además se le asigna una posible correlación con la Formación Valle de Ángeles y no con la formación Subinal (Gutiérrez & Martens, 2007).

Figura 14. **Conglomerados y areniscas, estación 2-3.**
A) Afloramiento, B) detalle y C) detalle



Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Esquistos cuarzo feldespáticos con clorita

Esta unidad se ha observado en la región y se ha asociado al grupo “El Tambor” en el mapa geológico de Sanarate (Lawrence, 1975), el cual se encuentra próximo. Los minerales observables son el cuarzo y feldespato además de micas verdes. La roca se encuentra plegada y fallada, además de fracturada (Figura 15). Dependiendo de su estado de alteración y fallamiento puede ser muy cohesiva y sana, o estar ya convertida en suelo.

Figura 15. **Esquistos cuarzo feldespáticos con clorita, estación 2-8.**
A) Afloramiento y B) detalle





Fuente: elaboración propia.

3.2. Alteración geológica en las rocas

La alteración observada fue de diferentes fuentes, acá se describen de una manera más genérica, debido a que se denominará alteración a cualquier acción que afecte la calidad original de la roca, desde alteración hidrotermal, pasando por alteración por acción tectónica en el caso de las zonas de cizalla y también existe meteorización, la cual es generada por la exposición de las rocas a la intemperie y a sus efectos.

La alteración hidrotermal se observó por medio de estructuras hidrotermales, como el remplazamiento y alteración en minerales, la unidad de roca afectada de manera más intensa fue la de toba riolítica, los tipos de alteración principalmente observadas fueron la argílica y clorítica. En la zona aún existen fuentes de alteración hidrotermal, tal es el caso de la zona del balneario Agua Caliente, que es la expresión de un sistema hidrotermal.

En lo que se refiere a la fracturamiento y fallamiento por actividad tectónica, se observa claramente en las estructuras mayores, falla por ejemplo que pone en contacto dos unidades de roca (figura 16), además hay procesos que afectan la roca de manera global como en la unidad de esquistos, los cuales han sido deformados de manera dúctil, ver fotografías de esquistos. En la zona también se observan fallas de bajo ángulo (Figura 15).

Figura 16. **Fotografía de zona de falla en las proximidades de Agua Caliente, estación 1-8**



Fuente: elaboración propia.

Las estructuras geológicas y la acción hidrotermal han acentuado la susceptibilidad de los materiales a ser degradados a suelo, mediante procesos de alteración mecánica y química de la superficie. Aun así en la zona de estudio no se han desarrollado espesores apreciables de suelo *sensu stricto*, se observó que los horizontes de suelo son predominantemente de 20 centímetros de espesor (ver fotografías de los taludes de roca).

3.3. Geología estructural local

3.3.1. Estructuras geológicas presentes

La zona posee rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, las cuales también han sufrido actividad tectónica debido a su proximidad con la zona de falla del Motagua, la cual está a 15 kilómetros. Por lo anterior existe variedad de estructuras singenéticas (originadas al momento de la formación de rocas) y postgenéticas (posteriores a la formación de las rocas), hay estructuras planares como: estratificaciones, foliaciones, fracturas y fallas. Estructuras lineales como: ejes de pliegue, elongación de minerales, estrías de falla, imbricación de clastos.

3.3.1.1. Estratificaciones

Este tipo de estructuras se observó en la unidad de conglomerados y areniscas, existe espaciamiento desde el tamaño de laminaciones de unos centímetros en los miembros más lutíticos y estratificaciones mayores a un metro (Figura 17).

Figura 17. **Estratificación métrica en conglomerados y areniscas, estación 2-6**

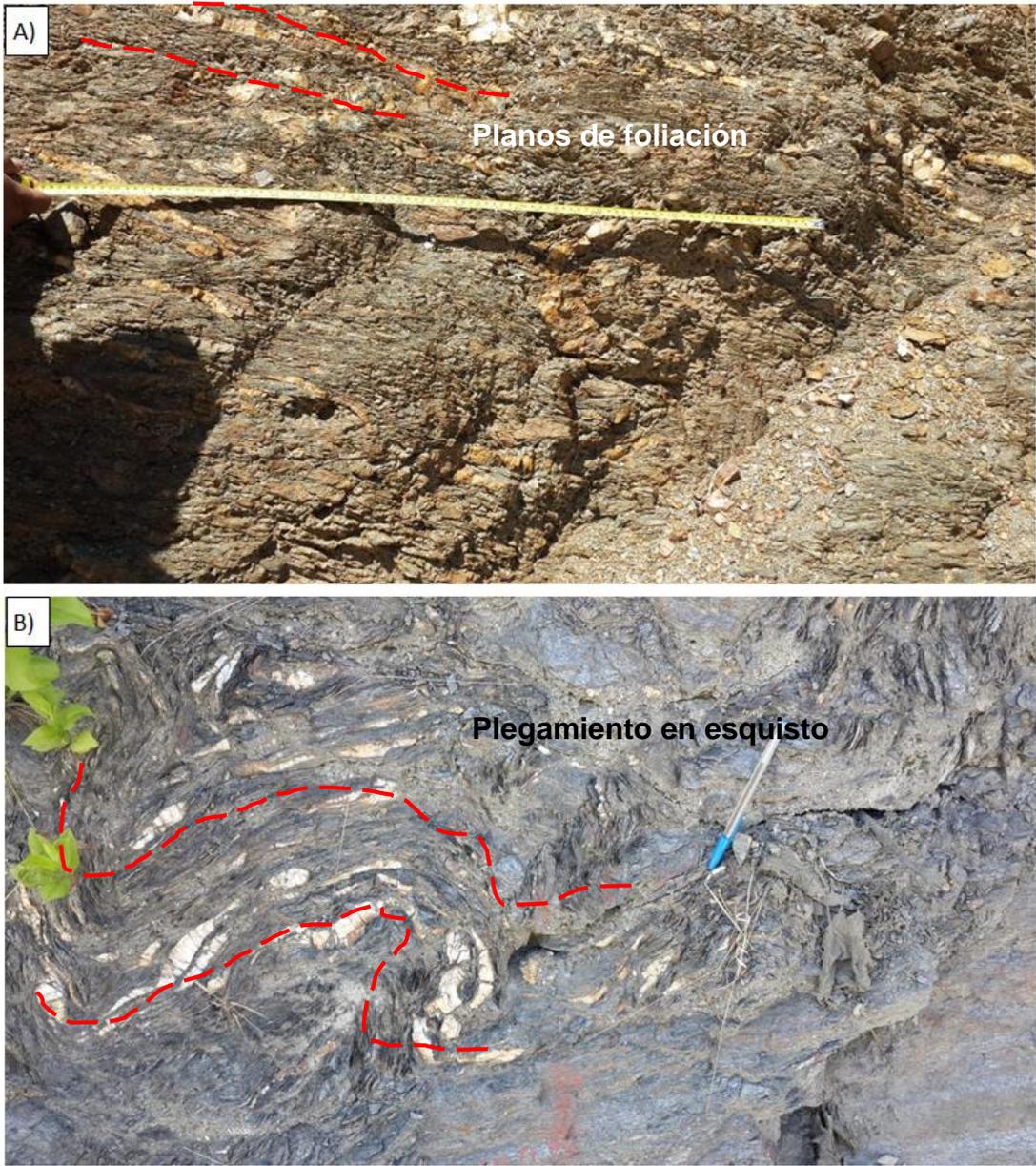


Fuente: elaboración propia.

3.3.1.2. Foliationes

Las foliaciones metamórficas se encuentran en la unidad de esquistos, allí se observó foliación de esquistosidad que es de milímetros a centímetros, puede tener bandeamiento composicional, también existe foliación de plano axial y de los flancos de los pliegues (figura 18).

Figura 18. **Foliación y plegamiento en unidad de esquistos, estación 2-2**
A) Foliación y B) Plegamiento denotado por bandas de cuarzo y feldespato



Fuente: elaboración propia.

3.3.1.3. Contactos

La mayoría de contactos observados son de tipo fallado, una roca con límites muy marcados con otra diferente en una superficie con fallada, también los hay erosivos, en los cuales los sedimentos o depósitos volcánicos se depositaron sobre una superficie erosiva.

En el caso de los depósitos volcánicos, se podría preservar una capa de paleosuelo, los cuales se han registrado en otras localidades (Koch & McLean, 1975).

Figura 19. **Fotografías de contactos, estación 2-3 (A) y 2-7 (B)**



Fuente: elaboración propia.

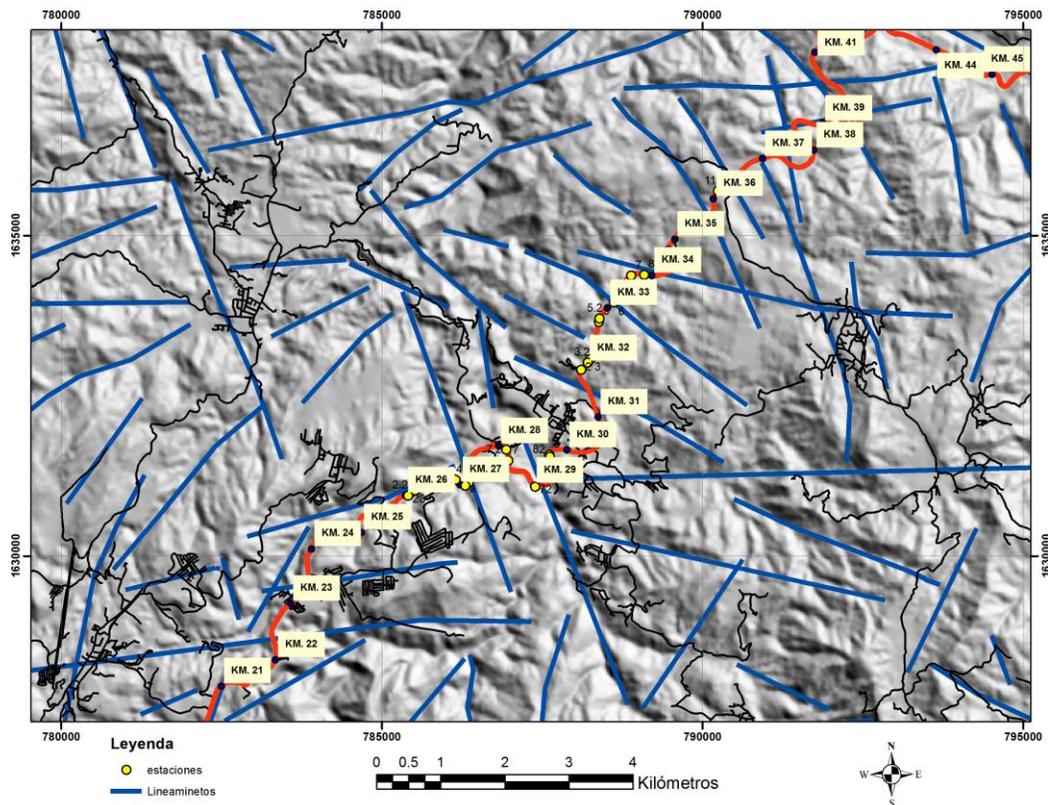
En general, las zonas de contacto no se observan con un halo de alteración marcado, únicamente una zona de cizalla.

3.3.1.4. Fallas

Las fallas que se observaron dentro de las unidades fueron de bajo ángulo, en la unidad de esquistos se observaron estas estructuras (figura 15 a). Además, los contactos de algunas unidades son subverticales, tal es el caso del falla de contacto que se observa en la figura 16.

Geomorfológicamente se observan estructuras alineadas que podrían corresponder a contactos y a estructuras geológicas. Estos lineamientos se comprobaron en campo, algunas coincidiendo con fallas observadas, la figura 16 es un ejemplo.

Figura 20. Mapa de lineamientos



Fuente: elaboración propia.

3.3.1.5. Discontinuidades

Se agrupa aquí a toda estructura que limita o rompe la continuidad en la roca, las medidas en este caso son fracturas, estratificaciones, foliaciones contactos entre tipos de roca y fallas. En este caso para tomar muestras representativas de los afloramientos se tomaron todas las estructuras presentes en una longitud figura 21.

Figura 21. **Medición de datos de espaciamiento de estructuras en afloramiento de estación 2-11**



Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Estadística estructural

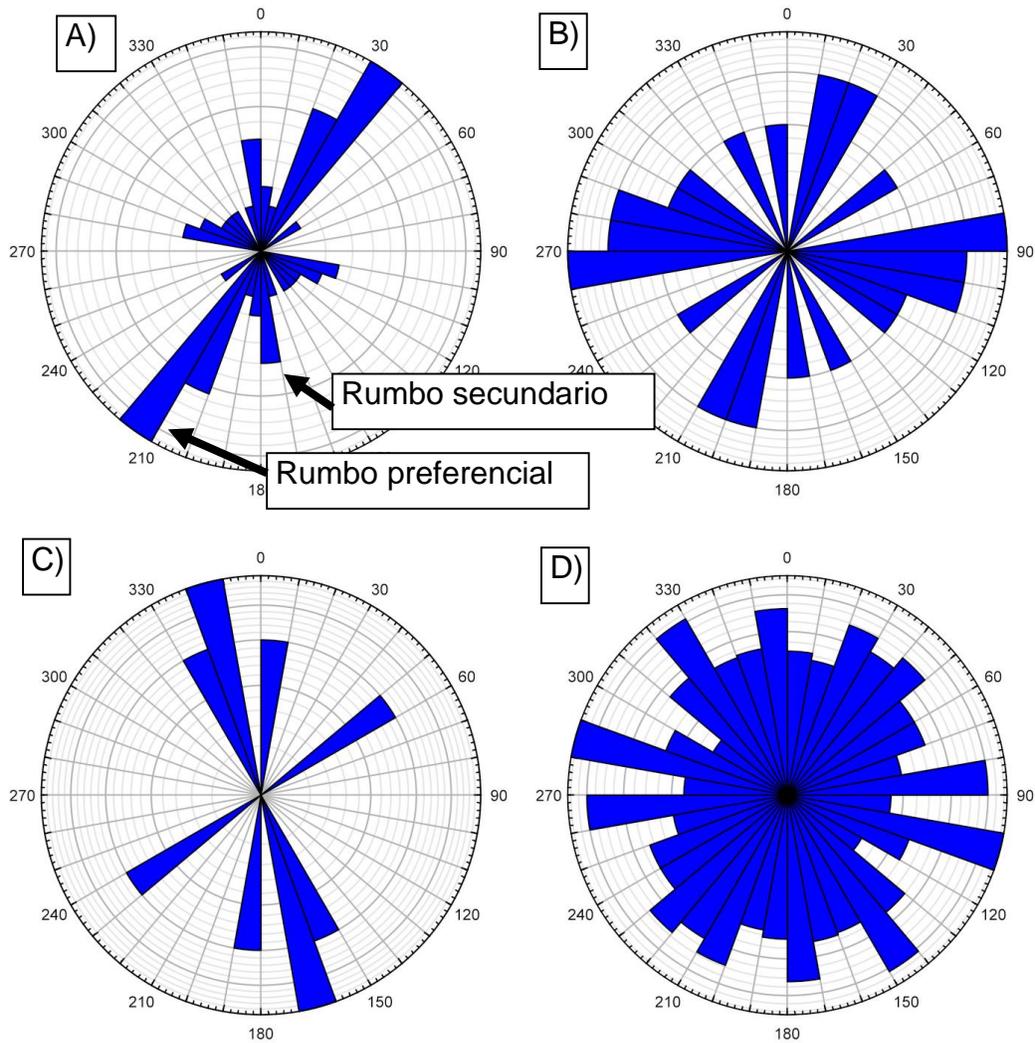
A continuación se realizan los diagramas de rosa y estereogramas para el análisis estructural, en el Anexo I se listan los datos estructurales utilizados.

3.3.2.1. Rosetas

Con los gráficos de rosa se observa que la mayor variación está en la distribución de orientaciones de fracturas, las foliaciones, estratificaciones y fallas poseen tendencias mejor definidas, muestran pétalos más grandes (Figura 22).

Por lo anterior, se debe de prestar atención a la variación de las fracturas, una vez que se ha definido las tendencias de estratificación, foliación y fallas.

Figura 22. Diagramas de roseta, de rumbo. A) Foliaciones, B) Fallas, C) estratificaciones y D) fracturas



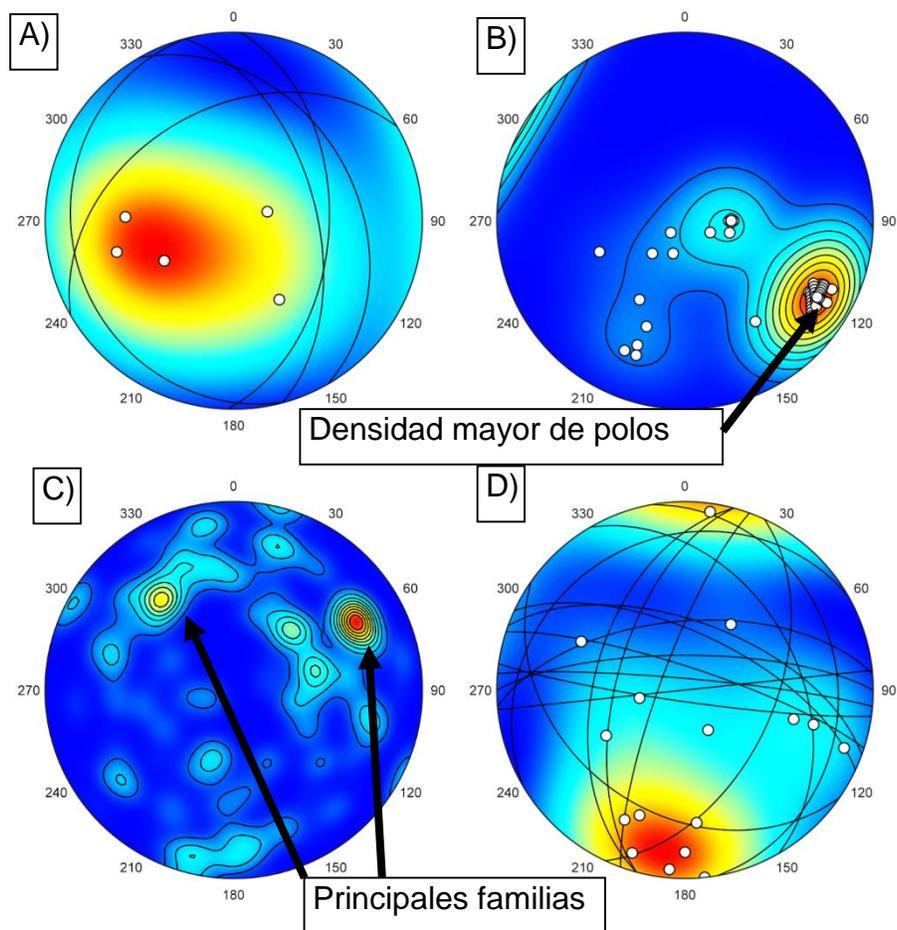
Fuente: elaboración propia.

3.3.2.2. Estereogramas

En los estereogramas que se presentan a continuación, se observa la distribución de los tipos de estructuras y cómo en algunos casos tienen una tendencia bien definida, por ejemplo, la estratificación y foliación (figura 23 A y B).

Los colores cálidos en los gráficos 3.13, muestran donde se encuentra la mayor población de polos, por lo que se pueden diferenciar más fácilmente cuáles son las principales familias de discontinuidades.

Figura 23. **Estereogramas de estructuras. A) Estratificaciones, B) Foliaciones, C) Fracturas y D) Fallas**



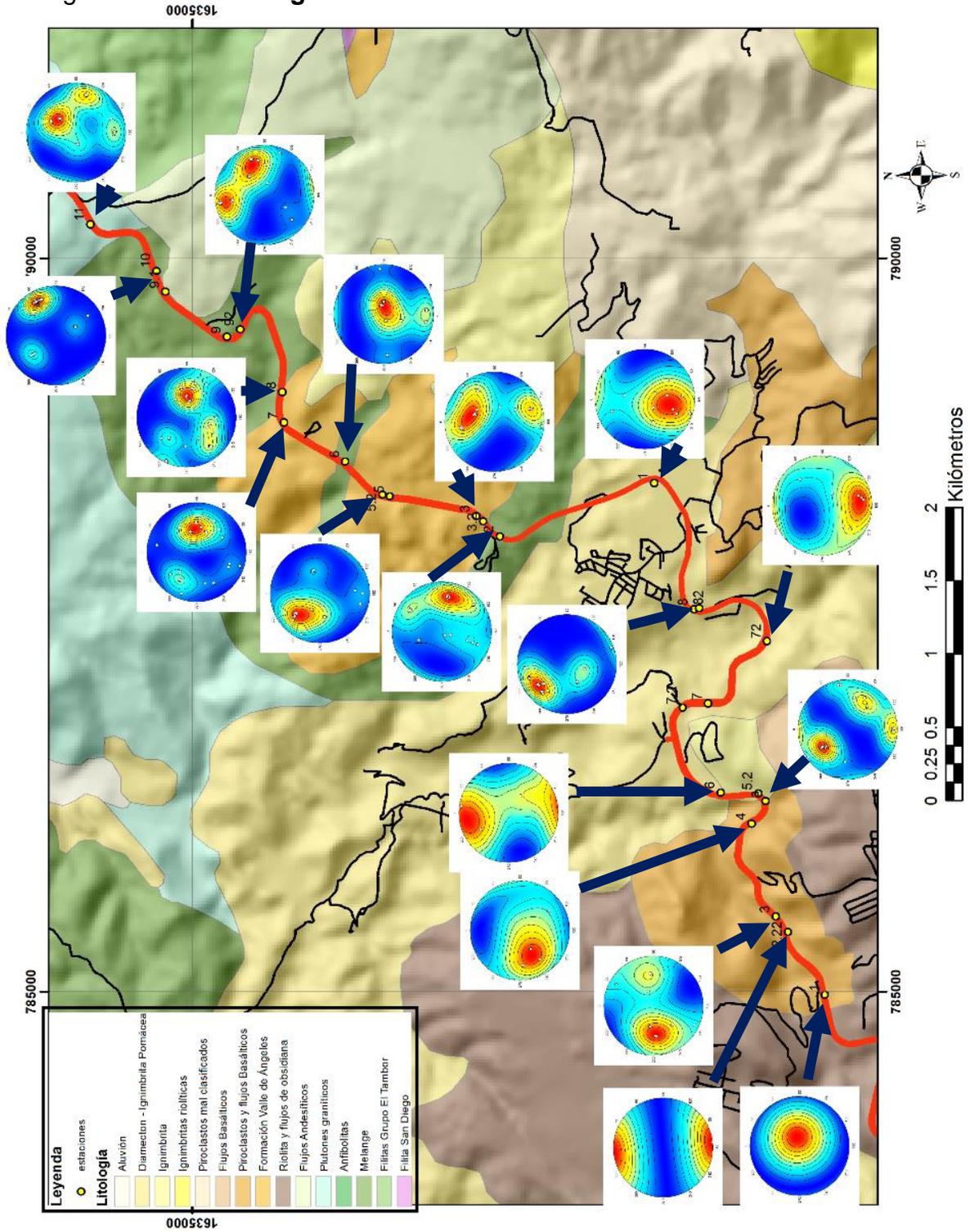
Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Dominios estructurales

La definición de dominios estructurales se debe de realizar con datos regionales para su comprendimiento y delimitación adecuada, sin embargo acá se hace una primera aproximación con los datos locales de los taludes, se observa también en los estereogramas que hay tendencias definidas por sectores.

En los gráficos de la figura 23, se observan cómo las estratificaciones y foliaciones están bien definidas, además cómo los contactos y las fallas tienen concordancia, en campo se observó que los contactos están fallados y que son consecuencia de la tectónica regional. Para comprender cómo las discontinuidades generales se distribuyen en la zona, se presenta el mapa siguiente (figura 24).

Figura 24. **Estereogramas de estructuras totales**



Fuente: elaboración propia.

3.3.4. Análisis de estabilidad de taludes por geología estructural

El método utilizado para el análisis de estabilidad de los taludes es la prueba de Marckland, la cual es una prueba para un análisis cinemático de bloques formados por las discontinuidades con relación a la orientación del talud y el ángulo de fricción de la roca.

3.3.5. Ángulo de fricción

La obtención del ángulo de fricción se obtuvo mediante la prueba, "Tilt Test" descrito en (Cosillo Pinto, 1999), en este caso, debido a que el estudio está enfocado a pruebas de campo se utilizaron fracturas naturales por lo que se obtiene el ángulo de fricción pico.

La medición se realizó utilizando dos bloques de roca secos y midiendo el ángulo en el cual desliza el bloque superior utilizando el clinómetro de la brújula, Figura 25.

Figura 25. **Medición de ángulo de fricción**



Fuente: elaboración propia.

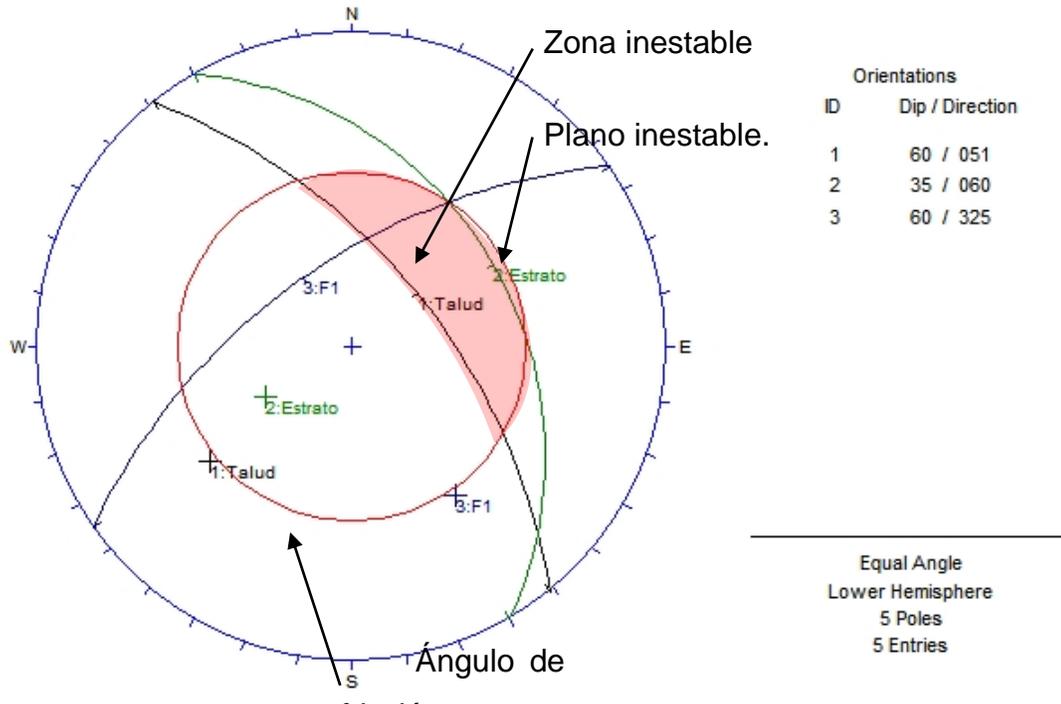
Un método alternativo es la utilización de GSI para la estimación de propiedades una de ellas, el ángulo de fricción. El GSI se obtuvo de las estaciones, esto añadido a la descripción realizada, permite hacer las estimaciones de varios valores en caso de necesitarlos.

3.3.6. Análisis de rotura

La prueba de Marckland es de las más utilizadas para realizar este tipo de análisis, se realiza para visualizar de mejor manera las zonas donde se puede dar movimiento.

Para la rotura Planar el ángulo de inclinación de las estructuras debe ser menor al del talud y mayor al del ángulo de fricción. Teniendo la restricción de que la dirección de inclinación del plano y del talud no debe variar más de 20°(Figura 26).

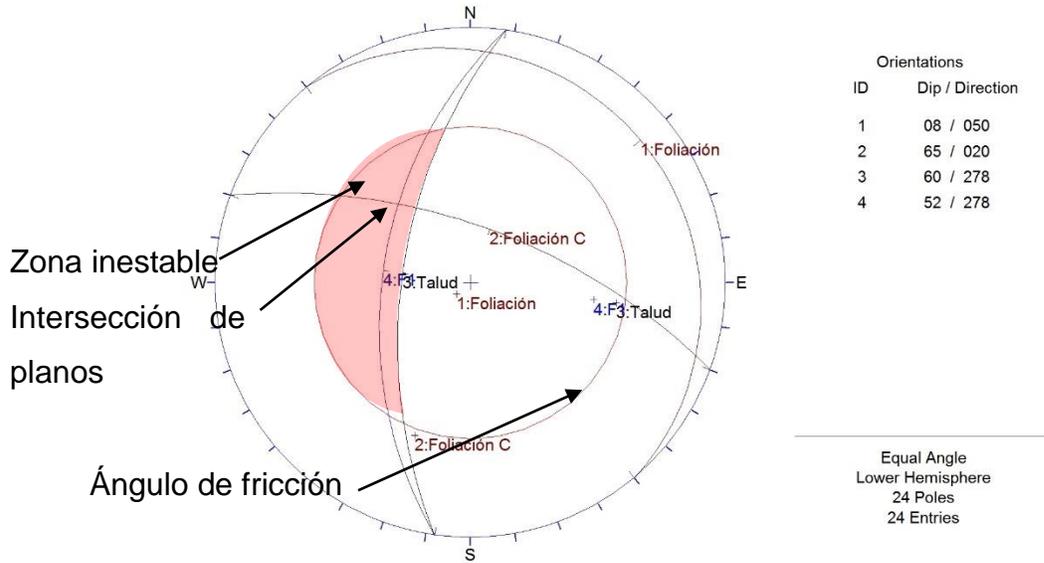
Figura 26. Posible rotura planar en estación 1-4



Fuente: elaboración propia.

En general, la prueba de Marckland se utiliza más para el análisis de cuñas, se refiere a que la orientación de intersección de planos sea favorecida con una inclinación en la cual el ángulo de fricción permita movimiento. Lo anterior cumpliendo con una geometría en la cual el movimiento sea permitido, un ejemplo de lo realizado se presenta en la figura 27, la metodología completa se detalla en (Cosillo Pinto, 1999).

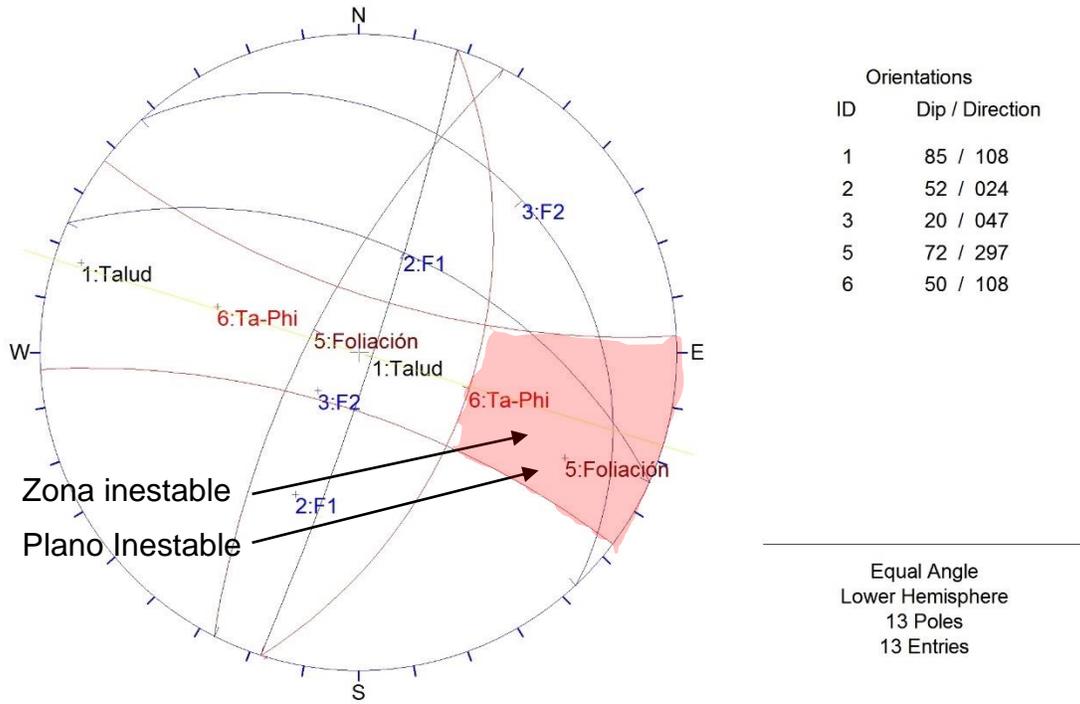
Figura 27. **Posible rotura en cuña, prueba de Marckland a estación 2-2**



Fuente: elaboración propia.

En el análisis por vuelco se analiza la inclinación del polo del plano que satisface la condición de variación menor de 20° en los rumbos del plano de la discontinuidad y orientación del talud, además de las condiciones de inclinación de planos y ángulo de fricción indicados en la sección 2.6, figura 28.

Figura 28. **Falla posible por vuelco, estación 2-1**



Fuente: elaboración propia.

Con el análisis anterior se produjeron los siguientes resultados (Tabla I), en algunos casos por el tipo de depósitos no se contaba con la información necesaria para realizar este análisis.

Tabla I. Resumen posibles roturas

Estación	Cuña	Planos involucrados en cuña	Planar	Planos involucrados, planar	Vuelco	Plano involucrado, vuelco
1-3	Estable		Estable		Estable	
1-4	Inestable	F1-Estratificación	Inestable	Estratificación	Estable	
1-5	Estable		Inestable	F1	Estable	
1-52	Estable		Estable		Estable	
1-6	Estable		Estable		Estable	
1-62	Estable		Estable		Estable	
1-7	Estable		Estable		Estable	
1-71	Estable		Estable		Estable	
1-8	Estable		Estable		Estable	
1-82	Estable		Estable		Inestable	F2
2-1	Estable		Estable		Inestable	Foliación
2-10	Estable		Estable		Estable	
2-11	Estable		Estable		Estable	
2-112	Estable		Estable		Estable	
2-2	Inestable	Foliacion C-F1	Inestable	F1	Estable	
2-22	Estable		Inestable	Foliación	Estable	
2-3	Estable		Estable		Estable	
2-5	Inestable	F3-F1, F3-F2, F3-Falla	Inestable	F1, F2,	Estable	
2-6	Estable		Estable		Estable	
2-7	Estable		Estable		Estable	
2-8	Inestable	F2-Falla, F3-Estratificación	Estable		Estable	
2-91	Estable		Inestable	F1	Estable	
2-92	Inestable	F3-Foliación, Falla-Foliación	Estable		Estable	
9-2	Estable		Estable		Estable	

Fuente: elaboración propia.

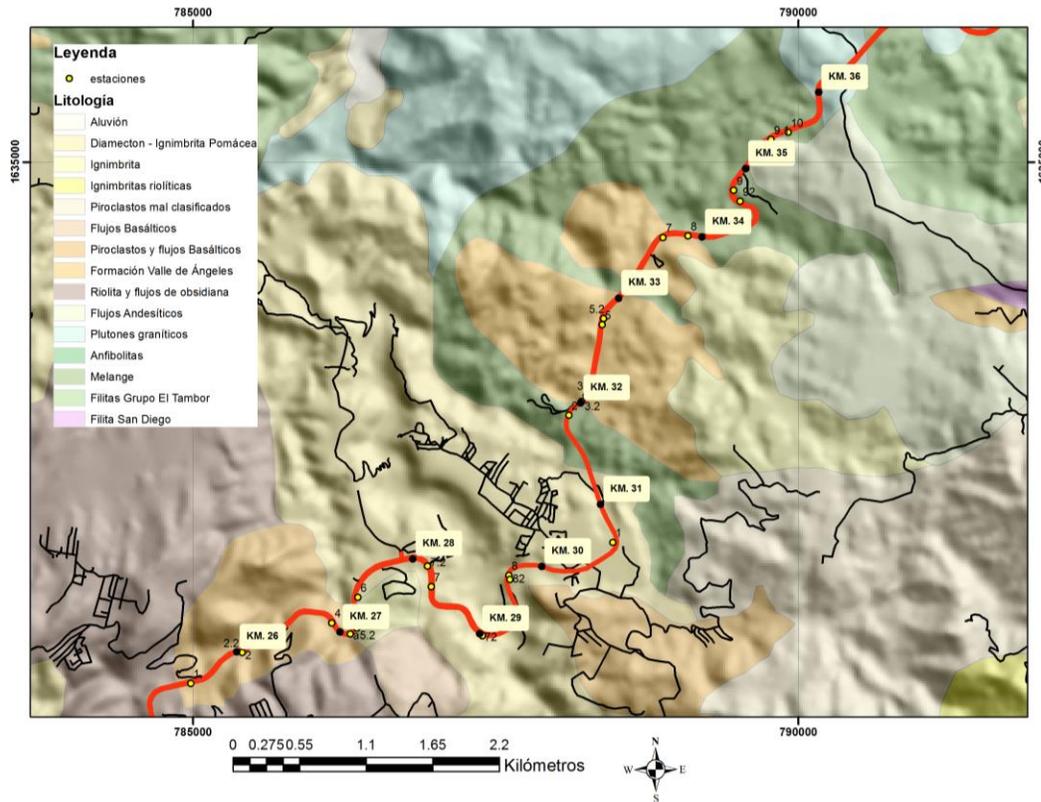
4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS LOCALES

4.1. Propiedades geotécnicas para la clasificación

4.1.1. Mapa de tipo de roca

En el capítulo uno, se explicó parte de la historia de la zona, por lo cual se explica la variedad de tipos de roca en la zona de estudio. Las relaciones de las diferentes unidades es compleja, existe fallamiento y plegamiento en las rocas, además las relaciones estratigráficas son complejas y pueden complicar el diseño de taludes estables. En la figura 29, se presenta la distribución de unidades de roca.

Figura 29. Mapa geológico



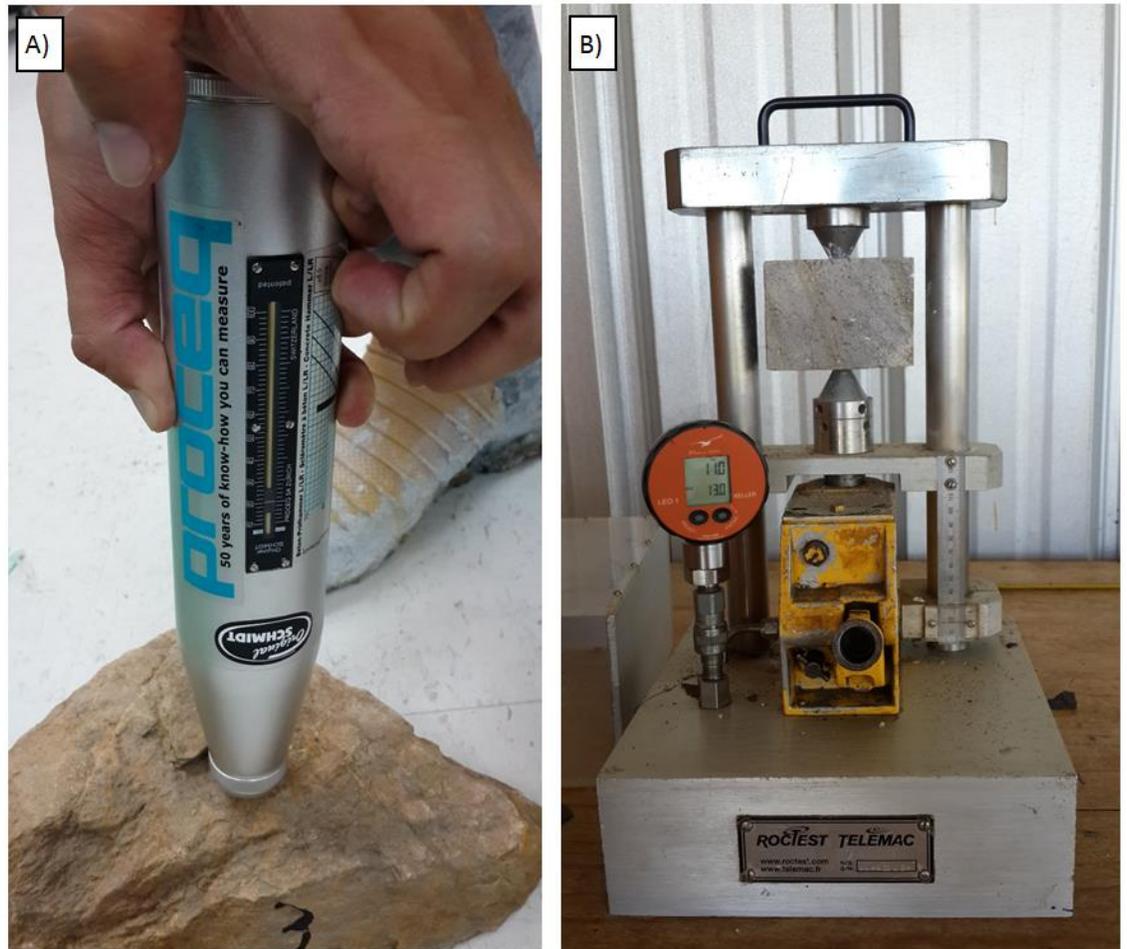
Fuente: elaboraci3n propia.

En algunas localidades pr3ximas se ha observado como roca con mayor resistencia y calidad (flujos bas3lticos) est3 sobre roca menos resistente (esquistos fallados), cuando la roca inferior falla, no soporta la superior y hace que colapse tambi3n. Lo anterior es un ejemplo de c3mo la estratigraf3a puede ser un factor a considerar.

4.1.2. Resistencia

Para obtenci3n de la resistencia se realizaron dos pruebas, se utiliz3 el martillo de Schmidt y se realiz3 el ensayo de carga puntual (figura 30). Se tomaron muestras representativas de las unidades de roca presentes para el an3lisis. Los resultados se presentan a continuaci3n.

Figura 30. Pruebas realizadas para determinación de resistencia. A) Martillo de Schmidt y B) ensayo de carga puntual

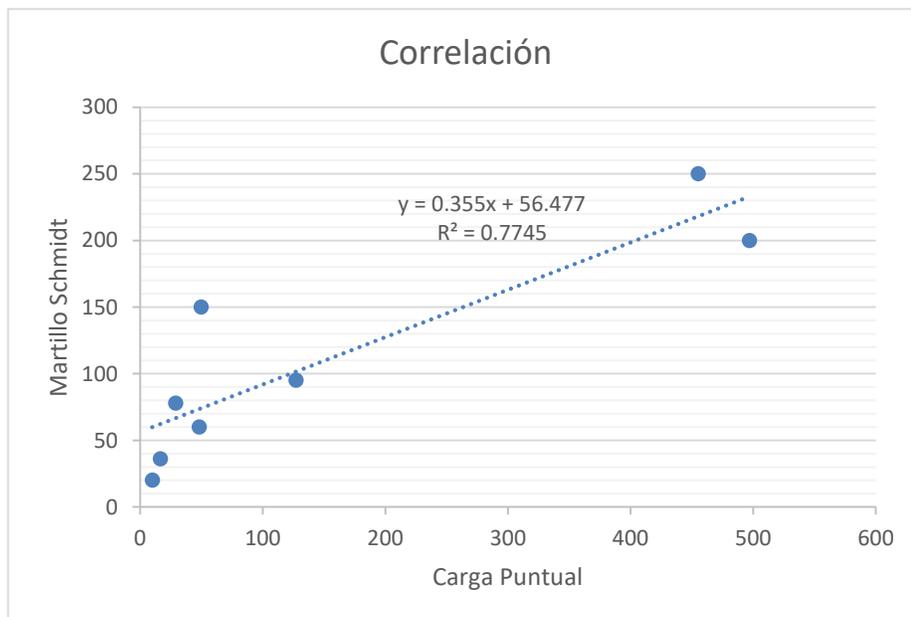


Fuente: elaboración propia.

En el siguiente gráfico, se observa la correlación de resultados, se prefirió el resultado por carga puntual cuando este estuvo disponible por ser un ensayo con un aparato más confiable, como se puede observar el coeficiente de determinación es de 0.77, lo cual apoya la idea de preferir los resultados de carga puntual al no haber muy buena correlación.

Figura 31. Datos de resistencia y correlación

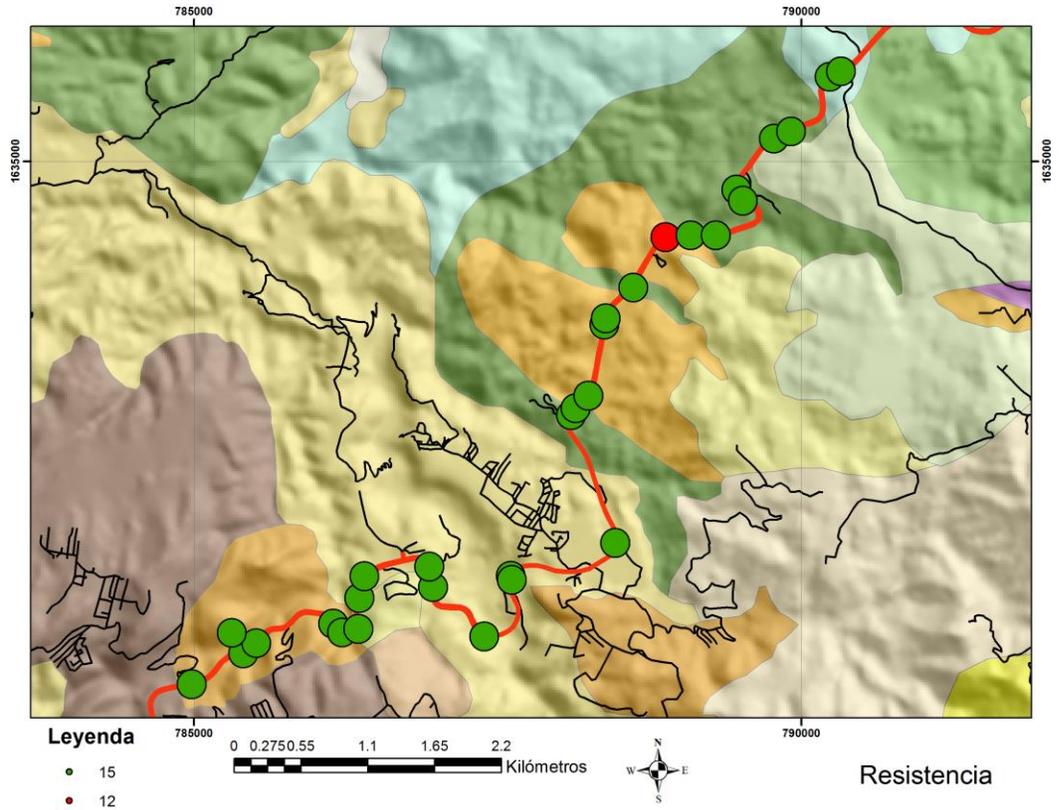
Muestra	Tipo de roca	Carga Puntual	Martillo Schmidt
M5	Lutita		60
M8	Conglomerado-Arenisca	48	60
M1	Basalto	497	200
M7	Toba Soldada	28.8	78
M10	Granito	455	250
#4#	Toba Soldada		34
M3	Esquisto Anfibólico	127	95
#6#	Conglomerado-Arenisca	9.8	20
M4	Arenisca	16.4	36
M9	Basalto	49.6	150



Fuente: elaboración propia.

La distribución de la resistencia de las rocas, se presenta a continuación con el resultado para valoración, según la clasificación RMR.

Figura 32. **Mapa de resultados de resistencia tras la valoración**

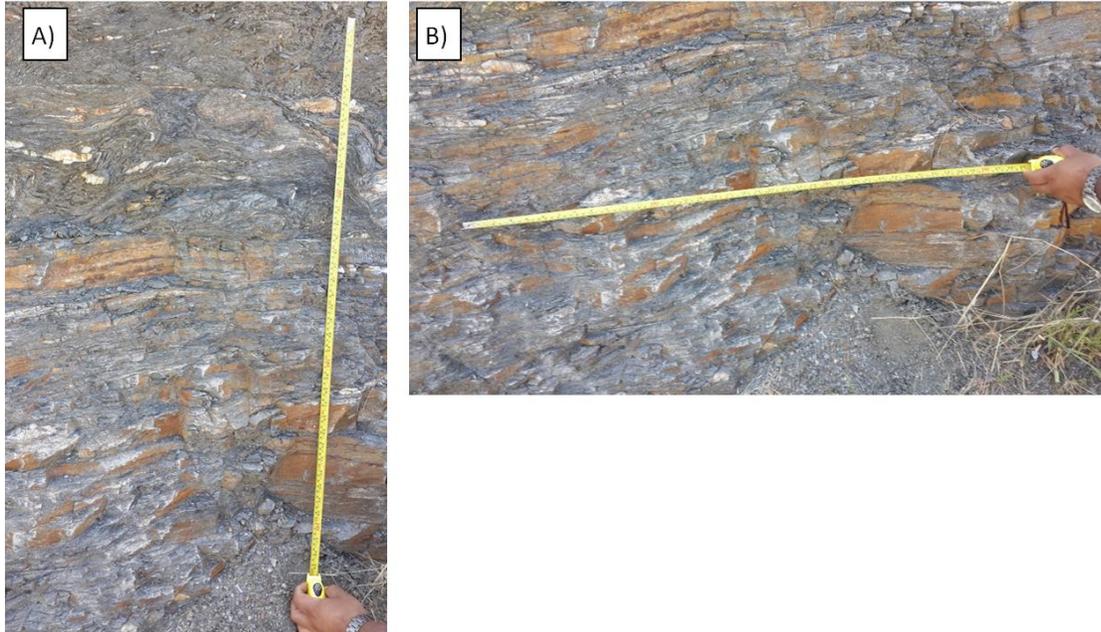


Fuente: elaboración propia.

4.1.3. RQD

El RQD se obtuvo de la medición de la densidad de fracturas en una longitud determinada, para prevenir el sesgo por orientación se tomaron medidas de forma perpendicular, figura 33.

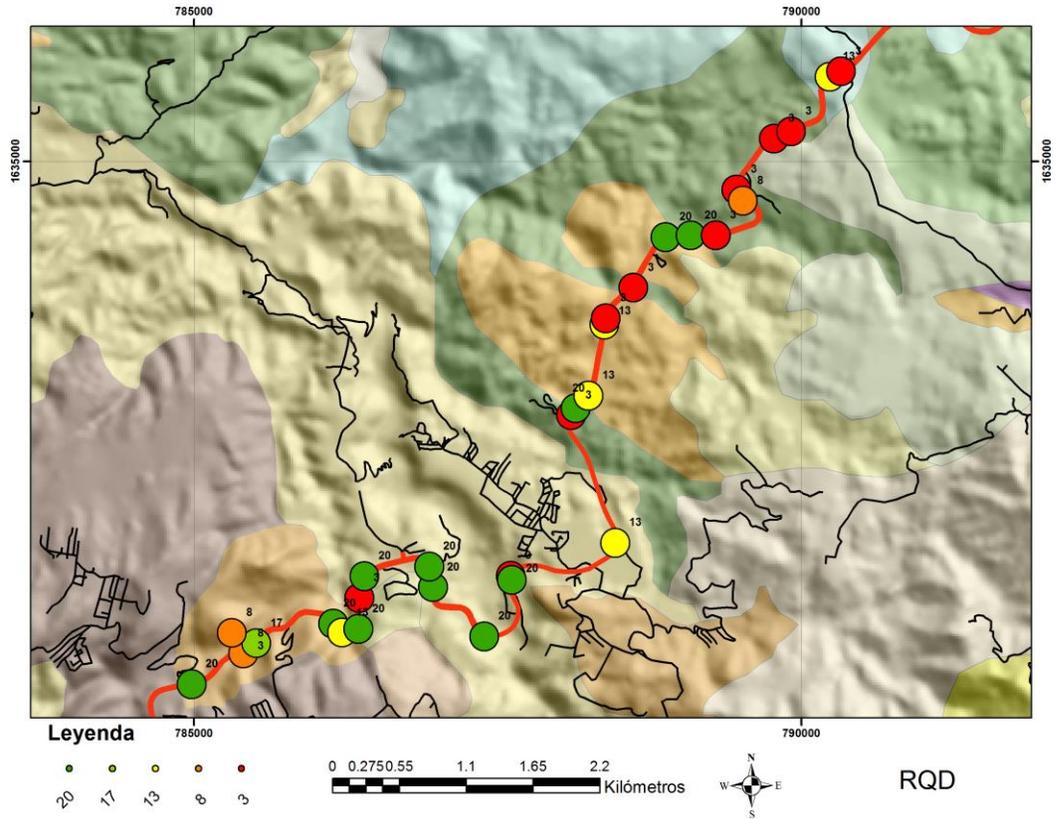
Figura 33. **Obtención de datos RQD. A) Medición vertical y B) medición en la horizontal**



Fuente: elaboración propia.

La orientación de medición se ha mencionado en la literatura como factor para la valoración correcta del RQD, por lo cual se tomaron mediciones perpendiculares, los resultados de la medición de RQD tras valoración se muestran en la figura 34.

Figura 34. Valoración RQD

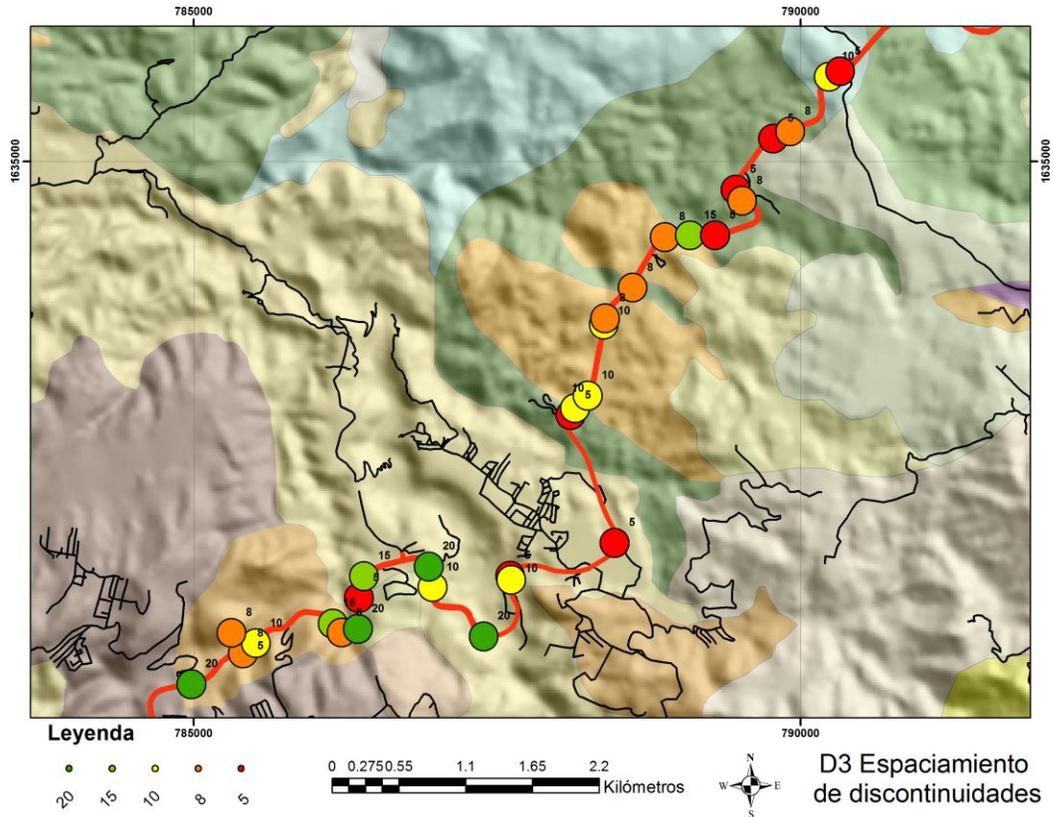


Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Espaciamiento de las discontinuidades

La valoración en este caso, se realizó con la utilización de la cinta métrica, los resultados tras la valoración se presentan en la figura 34. Se midió el espaciamiento de las discontinuidades, según la figura 4.

Figura 35. Valoración del espaciamiento de discontinuidades



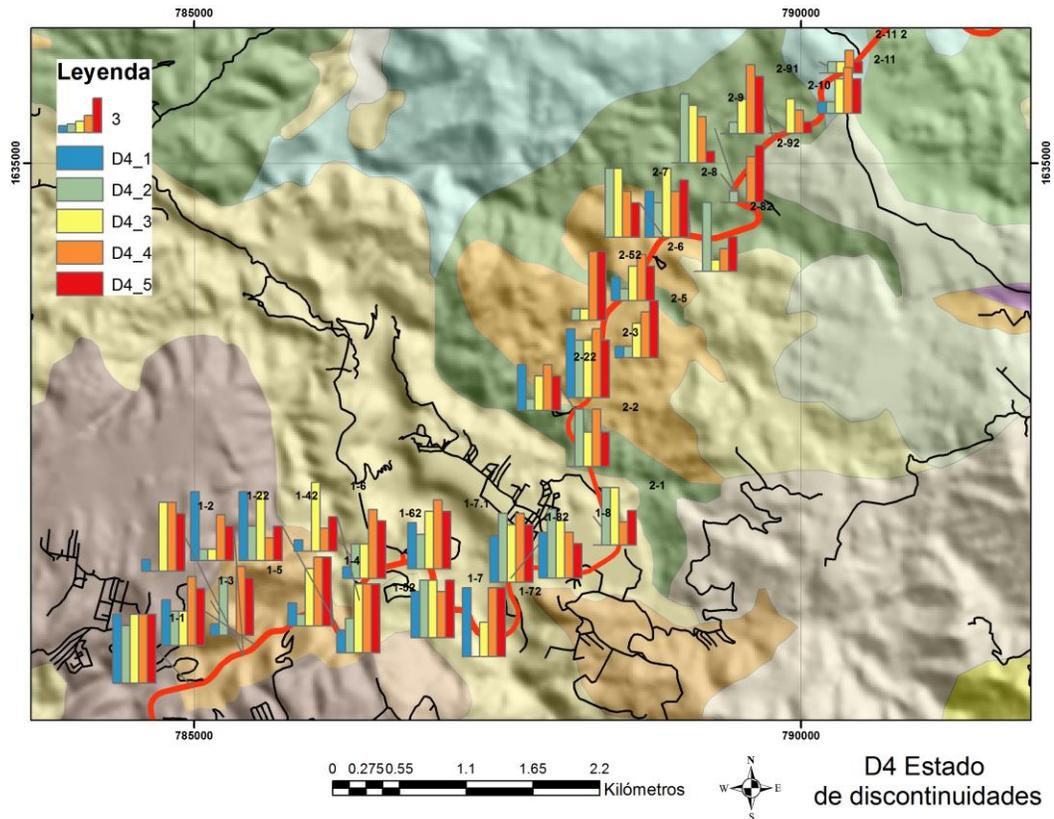
Fuente: elaboración propia.

Como se observa en el mapa anterior, las valoraciones más bajas se presentaron en las unidades norte, en la zona de esquistos.

4.1.5. Estado de las discontinuidades

En esta valoración inciden varias observaciones: 1) Longitud de la discontinuidad, 2) Abertura, 3) Rugosidad, 4) Relleno y 5) alteración. Cada una de ellas se muestra a continuación en la valoración por medio del gráfico de barras.

Figura 36. Valoración del espaciamiento de discontinuidades. D4_1 es Longitud de la discontinuidad, D4_2 es Abertura, D4_3 Rugosidad, D4_4 Relleno y D4_5 es Alteración



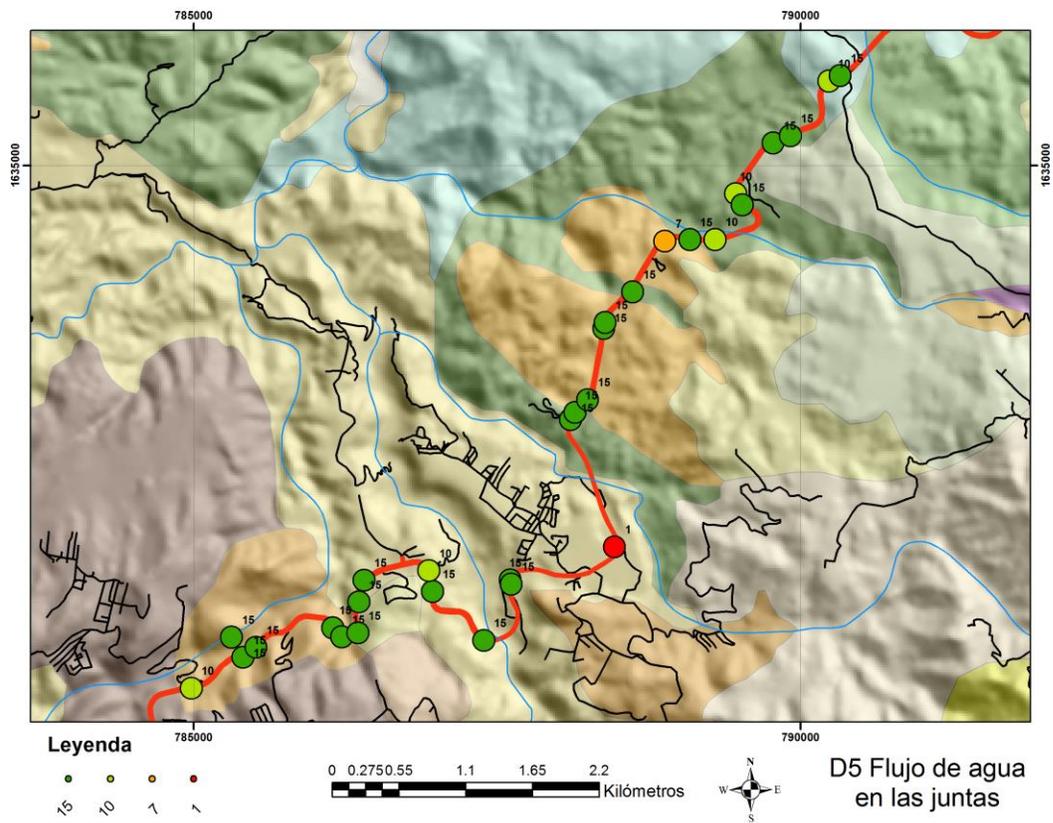
Fuente: elaboración propia.

La figura 36 indica que las zonas con las discontinuidades desfavorables a la estabilidad se ubican en la zona norte del área en la región de esquistos.

4.1.6. Flujo de agua en las juntas

Las observaciones de agua en las juntas se plasma a continuación (figura 37), en algunos casos la presencia de agua es dependiente de la época del año en la que se hagan las observaciones, lo cual es algo a tomar en cuenta.

Figura 37. Valoración del flujo de agua en las juntas



Fuente: elaboración propia.

4.1.7. Valoración RMR

La suma de los valores de resistencia, RQD, espaciamiento y estado de las discontinuidades, además del flujo de agua en las juntas. Se presenta a continuación (tabla II). En las figuras anteriores se puede observar la distribución de estas propiedades en la zona de estudio, la figura 4 presenta el significado de los valores plasmados en la siguiente tabla.

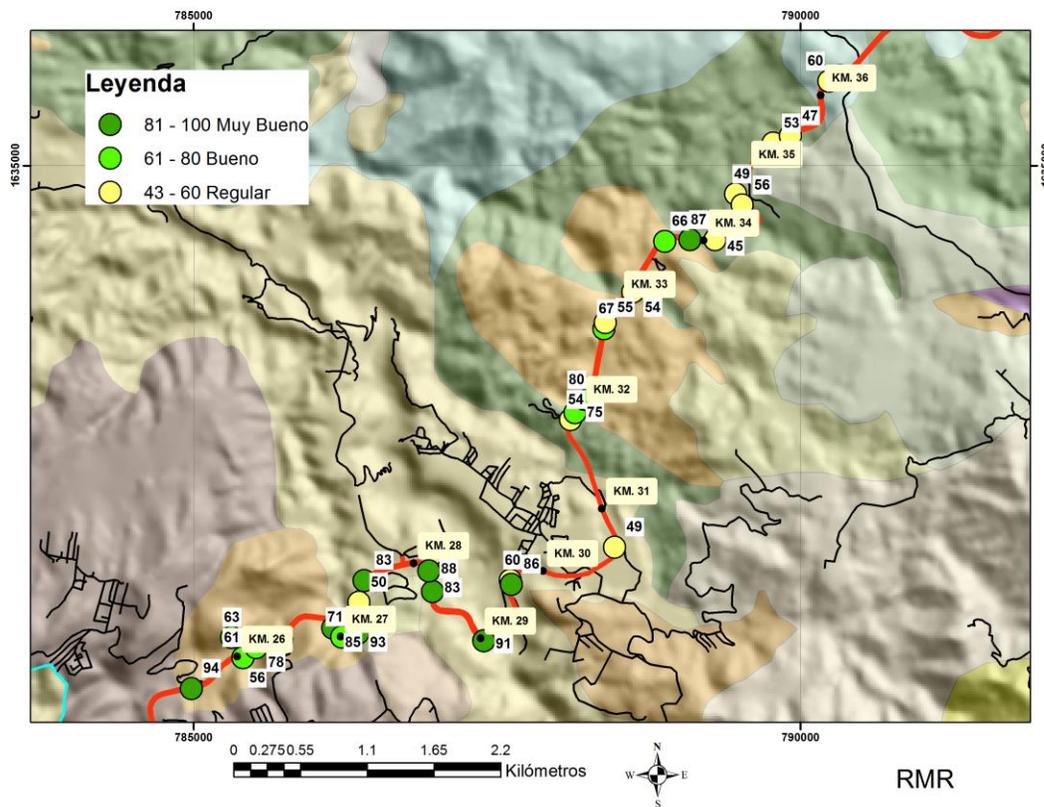
Tabla II. Valoración RMR

Estación	Resistencia	Valoración 1		RQD	Valoración 2	Valoración 3	Valoración 4					Valoración 5	RMR
							4.1	4.2	4.3	4.4	4.5		
1-1	34	15	20	20	20	6	5	6	6	6	10	94	
1-2	49.6	15	0	3	5	1	0	6	6	5	15	56	
1-22	497	15	50	8	8	6	1	1	4	3	15	61	
1-3	29	15	80	17	10	4	3	3	6	5	15	78	
1-4	34	15	100	20	15	2	1	5	6	6	15	85	
1-42	34	15	60	13	8	6	3	6	2	3	15	71	
1-5	455	15	45	8	8	1	5	0	6	5	15	63	
1-52	455	15	100	20	20	2	3	6	6	6	15	93	
1-6	78	15	10	3	5	1	0	6	2	3	15	50	
1-62	78	15	100	20	15	1	3	3	6	5	15	83	
1-7	78	15	90	20	10	4	5	5	4	5	15	83	
1-72	78	15	100	20	20	6	0	3	6	6	15	91	
1-7.1	78	15	100	20	20	4	3	5	6	5	10	88	
1-8	49.6	15	0	3	5	4	6	5	4	3	15	60	
1-82	49.6	15	100	20	10	4	6	5	6	5	15	86	
2-1	95	15	56	13	5	0	5	5	2	3	1	49	
2-2	95	15	20	3	5	0	5	3	5	3	15	54	
2-22	95	15	100	20	10	4	1	3	4	3	15	75	
2-3	9.8	15	70	13	10	6	5	5	6	5	15	80	
2-5	60	15	70	13	10	1	1	3	4	5	15	67	
2-52	60	15	0	3	8	0	1	1	6	6	15	55	
2-6	36	15	25	3	8	2	1	3	4	3	15	54	
2-7	9.8	12	100	20	8	0	6	6	4	3	7	66	
2-8	48	15	100	20	15	4	3	6	4	5	15	87	
2-82	48	15	0	3	5	0	6	1	2	3	10	45	
2-9	127	15	0	3	5	0	6	5	4	1	10	49	
2-92	127	15	50	8	8	0	1	0	4	5	15	56	
2-91	49.6	15	0	3	5	0	1	3	6	5	15	53	
2-10	49.6	15	10	3	8	0	0	3	2	1	15	47	
2-11	34	15	70	13	10	1	1	3	4	3	10	60	
2-11 2	34	15	0	3	5	0	1	1	2	1	15	43	

Fuente: elaboración propia.

La figura 38 muestra la distribución espacial de los resultados de la tabla II.

Figura 38. Valoración RMR



Fuente: elaboración propia.

4.2. Correcciones para obtención de SMR

Se indicó en el apartado 2.3, que el SMR es un RMR modificado que hace la valoración de la orientación de las discontinuidades en relación a la orientación del talud en el que se encuentran. Es así que se analiza el paralelismo de los planos con la cara del talud para evaluar susceptibilidad para falla por vuelco y por falla planar (Tabla III).

Para la obtención de los parámetros de corrección se eligió la familia de planos más representativa y menos conveniente. Las valoraciones se explican así: F1 se refiere al paralelismo entre la dirección de inclinación del talud y la familia de discontinuidades analizada; F2 se refiere a qué tan inclinada esta la familia de juntas, en general lo más vertical es menos favorable; F3, valora la diferencia de inclinación entre el talud y la familia de juntas; y por último, F4 evalúa el método de excavación utilizado para el talud.

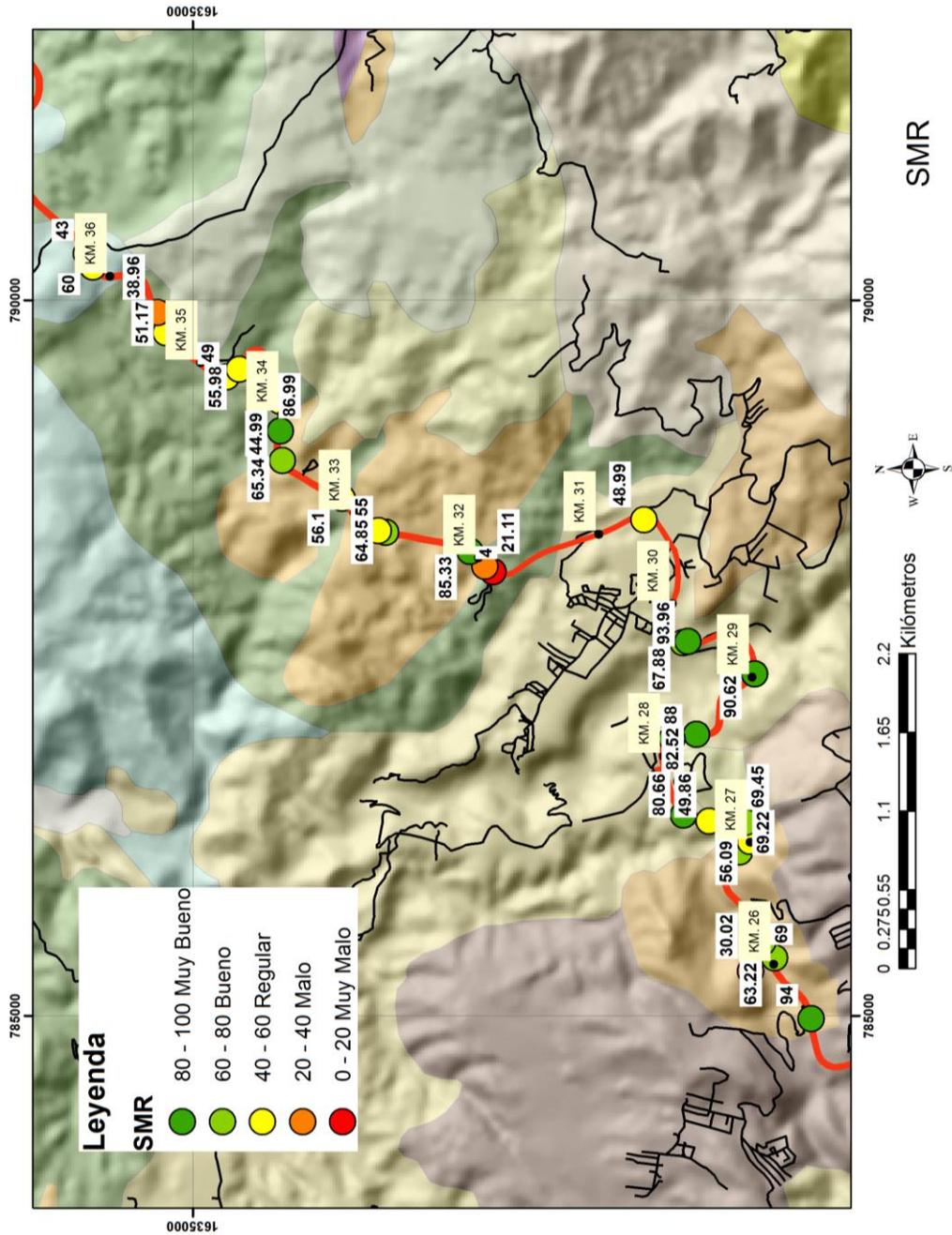
Tabla III. Valoración de parámetros SMR

Estación	RMR	DipDir talud	Dip talud	DipDir junta	Dip junta	Diferencia de rumbo	Falla susceptible	Valoración F1	F2	Valoración F2	F3	Valoración F3	Valoración F4	SMR
1-1	94	345	60	255	15	90 plana		0.00	0.07	0.15	-45	60	0	94.00
1-2	56	300	45	255	15	45 plana		0.09	0.07	0.15	-30	60	8	63.23
1-22	61	335	35	356	86	21 plana		0.41	204.51	1	51	0	8	69.00
1-3	78	320	50	86	53	54 plana		0.04	1.76	1	3	6	0	77.78
1-4	85	51	60	77	54	26 plana		0.32	1.89	1	-6	50	0	69.23
1-42	71	50	60	77	54	27 plana		0.30	1.89	1	-6	50	0	56.09
1-5	63	142	68	132	57	10 plana		0.68	2.37	1	-11	60	8	30.03
1-52	93	282	54	276	39	6 plana		0.80	0.66	0.65575018	-15	60	8	69.45
1-6	50	280	60	168	73	112 vuelco		0.01	1.00	1	133	25	0	49.87
1-62	83	258	60	122	87	136 vuelco		0.09	1.00	1	147	25	0	80.67
1-7	83	95	65	141	68	46 plana		0.08	6.13	1	3	6	0	82.53
1-72	91	98	70	345	48	67 plana		0.01	1.23	1	-22	60	0	90.62
1-7.1	88	60	55	141	68	81 plana		0.00	6.13	1	13	0	0	88.00
1-8	60	280	65	352	63	72 plana		0.00	3.85	1	-2	50	8	67.88
1-82	86	0	90	286	32	106 vuelco		0.00	1.00	1	122	25	8	93.96
2-1	49	108	85	24	52	84 plana		0.00	1.64	1	-33	60	0	49.00
2-2	54	278	60	278	52	0 plana		1.00	1.64	1	-8	50	0	4.00
2-22	75	318	69	135	52	3 plana		0.90	1.64	1	-17	60	0	21.12
2-3	80	138	70	188	42	50 plana		0.05	0.81	0.810727443	-28	60	8	85.34
2-5	67	270	70	135	61	135 vuelco		0.09	1.00	1	131	25	0	64.86
2-52	55	312	65	10	28	122 vuelco		0.02	1.00	1	93	0	0	55.00
2-6	54	311	72	300	11	11 plana		0.65	0.04	0.15	-61	60	8	56.11
2-7	66	335	60	275	38	60 plana		0.02	0.61	0.61040723	-22	60	0	65.34
2-8	87	6	60	272	36	86 plana		0.00	0.53	0.527864045	-24	60	0	87.00
2-82	45	8	65	272	36	84 plana		0.00	0.53	0.527864045	-29	60	0	45.00
2-9	49	255	70	165	53	90 plana		0.00	1.76	1	-17	60	0	49.00
2-92	56	315	60	235	44	80 plana		0.00	0.93	0.93255481	-16	60	0	55.99
2-91	53	295	68	299	70	4 plana		0.87	7.55	1	2	6	0	47.81
2-10	47	347	60	241	62	106 vuelco		0.00	1.00	1	122	25	-8	38.96
2-11	60	346	60	246	54	100 vuelco		0.00	1.00	1	114	0	0	60.00
2-11.2	43	340	60	209	36	131 vuelco		0.06	1.00	1	96	0	0	43.00

Fuente: elaboración propia.

Con las valoraciones realizadas, se modificó el valor del RMR para producir el SMR que se presenta a continuación en su distribución espacial (figura 39).

Figura 39. Valoración SMR



Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

A continuación se revisan las observaciones realizadas y se analizan los resultados.

Se puede mencionar que con lo observado, si no se dispone de equipo para la realización de ensayos de resistencia, se puede utilizar el método del GSI junto con los parámetros σ_{ci} (uniaxial compressive strength), m_i (material constant of the intact rock) y D (disturbance factor), para determinar valores de referencia de resistencia (Rockscience, 2016).

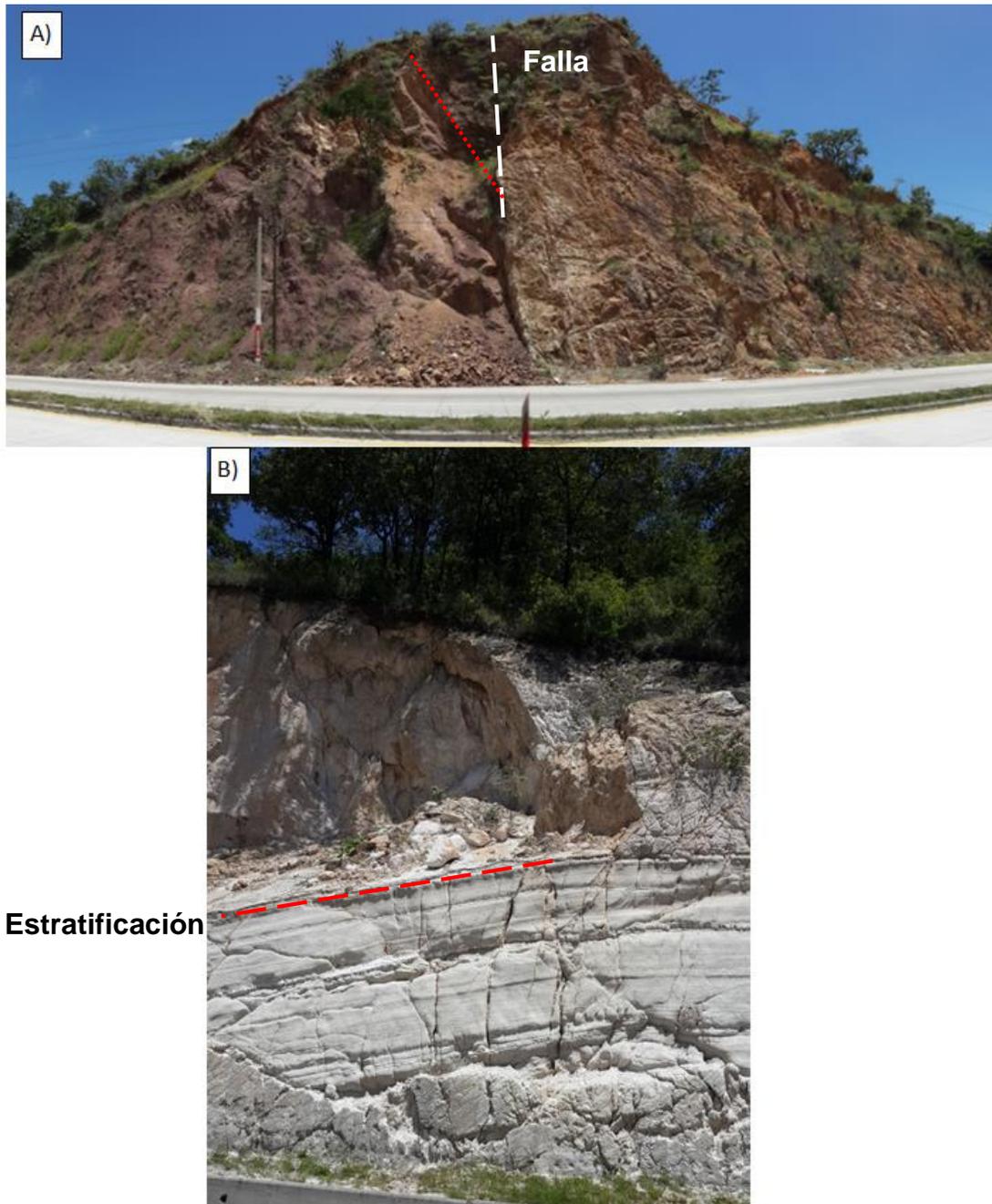
Con el GSI también se puede estimar un ángulo de fricción y una cohesión de la roca.

Lo anterior permite realizar descripciones preliminares de manera completa sin utilizar demasiado equipo, únicamente utilizando tablas y equipo asequible.

5.1. Análisis estructural

Las estructuras geológicas son importantes en el análisis, debido a que cuando la roca se encuentra con buen RMR, la falla se dará por las discontinuidades. La figura 40 gráfica los tipos de falla observados.

Figura 40. Taludes inestables. Rotura por cuña entre falla y estratificación, estación 2-6 B) Falla planar sobre estratificación, estación 1-4.



Fuente: elaboración propia.

Las estructuras geológicas de la zona poseen tendencias fuertes, la zona está próxima a las zonas de falla mayores de Guatemala, en los gráficos de la figura 23 se observa como estas tendencias están marcadas (la foliación y estratificación presentan densidades fuertes); sin embargo cómo se muestra el caso de la foliación, los datos pueden tener variación por la deformación que han sufrido estas rocas, figura 18 B.

Las estratificaciones poseen también una orientación preferencial, estos datos se refieren a los conglomerados y areniscas, los cuales se inclinan preferiblemente al Este.

Las foliaciones y estratificaciones son importantes en la medición, debido a que son rasgos repetitivos en el macizo rocoso, las foliaciones son de milímetros a centímetros, mientras que la estratificación varía hasta el metro.

En las fracturas medidas de la zona, según el diagrama 23 C, se pueden observar 2 familias principales, una en dirección 62/N242 y la otra 50/N140, las cuales son las de consideración para la zona.

Regionalmente existe una tendencia Este-Oeste para fallas y cuerpos de roca, la cual se observa en los contactos y fallas, en la figura 22B se observa esta tendencia.

Es muy importante conocer el entorno geológico y la historia geológica de la zona para comprender cuáles pueden ser las rocas más débiles y cuáles las más estables, así como tener una idea de la posible continuidad de las estructuras mayores.

Los valores de corrección del SMR son útiles para considerar las discontinuidades en la valoración, como se observó en las tablas de valoración y en los mapas de RMR (figura 38) y SMR (figura 39), los resultados varían al considerar las discontinuidades principales pues al reportar RMR los resultados varían de muy bueno a regular mientras que el SMR varían desde muy malo hasta muy bueno (Figura 41).

El análisis de las discontinuidades por métodos de geología estructural es importante para la determinación de los tipos de falla susceptibles a ocurrir (Tabla I). Se pueden realizar análisis más exhaustivos para tener más clara la situación de posibles fallas.

La prueba de Marckland se considera una útil herramienta al considerar la geometría de talud y las discontinuidades con el ángulo de fricción por medio del cual se determina la estabilidad del conjunto; en este caso se consideró su utilización como complemento al considerar la falla por cuña, además de la planar y vuelco considerada en el SMR.

Normalmente cuando se identifican zonas que requieren alguna acción se estudian los bloques inestables y se establece con las condiciones locales la necesidad de modificar la geometría del talud o de reforzar la zona, para volverla estable o de simplemente provocar la caída del resto del material.

5.2. Análisis litológico

Se identificaron cinco unidades de roca principales, cada uno de ellos con diferente origen e historia, lo cual les confiere diferentes propiedades y características, la resistencia por ejemplo, la hace variar de 9.8 Mpa hasta 497 Mpa. Internamente las unidades también varían en propiedades por los esfuerzos que las han afectado, además de la alteración hidrotermal identificada y la meteorización por agentes externos.

Los esquistos poseen minerales planares que han sido plegados y alterados, es la unidad con mayor densidad de discontinuidades, lo cual se puede apreciar en las figura 18 y 33. A esta unidad se considera emplazada por procesos tectónicos, por lo que se encuentra muy afectada por fallas. La valoración de esta unidad es la peor en RQD, ver figuras 33 y 34.

Los granitos son de las rocas con mayor resistencia en la zona de estudio, los observados se encuentran casi exclusivamente afectados por fracturas, esta unidad tiene carácter ígneo intrusivo, por lo que en algunas zonas debe estar relativamente sana.

En el caso de los conglomerados y areniscas, son rocas sedimentarias con la discontinuidad principal siendo la estratificación, son rocas porosas con potencial de acuífero.

Los flujos basálticos, pueden ser de diferente espesor, individualmente las rocas pueden ser de gran resistencia (figura 31), por la fracturación puede no ser estable dependiendo de las juntas, figura 12.

Los depósitos pomáceos y vulcano-sedentarios engloban varias unidades geológicas; sin embargo, para los fines de este estudio existen muchas semejanzas, por lo cual se agruparon. En esta unidad hay depósitos que se asemejan a un “suelo” desde el punto de vista de la ingeniería civil.

Conocer la historia geológica de la zona es importante para conocer la posible afectación de las unidades a diferentes fenómenos, así como para comprender mejor la distribución, contactos y fallas mayores.

Gonzales Vallejo propone como el límite entre suelo y roca la resistencia de entre 1 y 1.25 MPa (González de Vallejo, 2003), siguiendo este criterio las unidades analizadas cumplen con la clasificación de roca. Es opinión del autor del presente informe considerar el grado de trituración de la roca para evaluar si se analizará el material por métodos de mecánica de suelos, al menos como revisión y en la frontera suelo-roca es aconsejable siempre la revisión por mecánica de suelos.

Aunque no hay un límite claro entre ambos materiales, el GSI y sus parámetros pueden ser guía (Figura 7), las rocas a considerar como suelo podrían ser disgregables con la uña o con una navaja por ejemplo.

5.3. Relación entre propiedades geológicas y geotécnicas

Las cinco unidades tienen propiedades diferentes entre sí y han sufrido de diferentes procesos que las han afectado. En general, las rocas más antiguas son las que han sufrido más eventos tectónicos y las que tienen las discontinuidades más afectadas y en mayor densidad. Se debe considerar que la zona es afectada aun por una tectónica activa.

Si se tiene en cuenta lo anterior, se explica como en la Unidad de Esquisto los valores de RQD, espaciamiento de discontinuidades y estado de discontinuidades, presentan valores más bajos que el resto de unidades. Haciendo esta unidad la de peor valoración de RMR.

Siguiendo en antigüedad y en afectación esta la Unidad de Conglomerados y Areniscas, una propiedad característica de esta unidad es la estratificación, la cual genera planos de discontinuidades repetitivas con la misma orientación, además de las fracturas y fallas identificadas, se debe tomar en cuenta en el análisis geológico estructural.

Las unidades ígneas, flujos basálticos y el granito, tienen fracturas generadas entre otros factores, por el enfriamiento y diferenciación magmática, lo cual podría generar familias de discontinuidades más erráticas, haciendo necesario el análisis detallado por sitio. Estas unidades son las que registraron mayor resistencia, por lo que se deduce que los métodos de geología estructural serán importantes para determinar la estabilidad de los taludes.

La unidad de depósitos pomáceos y vulcano-sedimentarios, son las unidades más recientes y relativamente menos afectadas por el fallamiento, poseen pocas discontinuidades más que la estratificación y/o pseudoestratificación.

De las observaciones realizadas durante la realización del presente estudio se hacen las siguientes observaciones a tener en cuenta para futuros estudios.

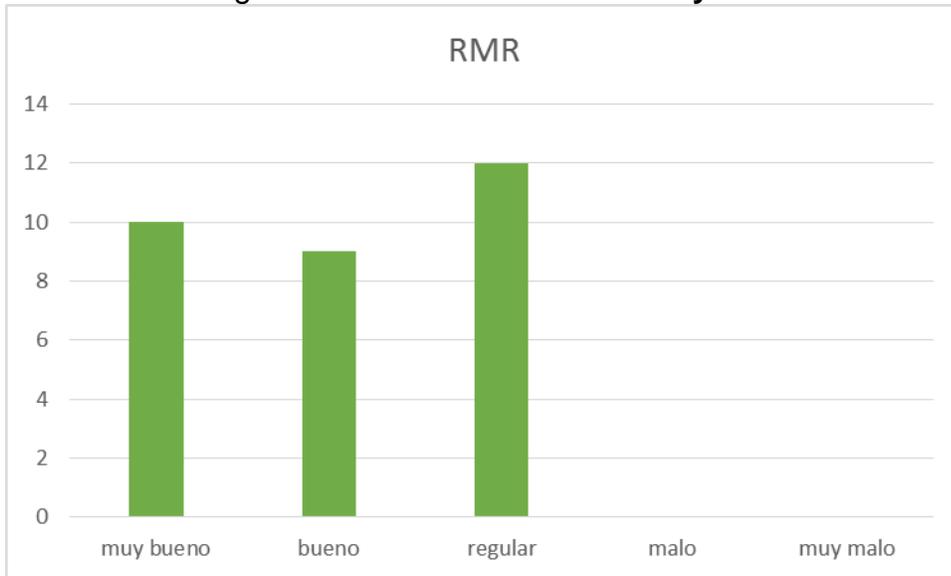
Se considera útil conocer la historia geológica de las rocas para considerar el grado de afectación que pueden tener y como pueden variar espacialmente estas propiedades. Por ejemplo, es diferente tener una zona con RMR bajo que se debe a una zona de cizalla, que tener una zona de alteración hidrotermal. La primera puede ser local y la segunda puede ser más regional.

En el caso de las discontinuidades de ser una zona con menos variedad litológica será especialmente útil conocer la tendencia de foliación o estratificación y las familias principales de discontinuidad para establecer las direcciones en las cuales es menos favorable la dirección de inclinación de taludes.

5.4. Mapa de calidad de roca

Se realizó la valoración RMR y SMR, observando que la valoración de calidad de roca pasó de regular-muy bueno a toda la gama desde muy malo-muy bueno para la valoración SMR. Lo anterior demuestra el grado de afectación que puede tener un talud por las discontinuidades que posea (Figura 41).

Figura 41. Valoraciones RMR y SMR



Fuente: elaboración propia.

Los resultados se aprecian en las figuras 38 y 39; sin embargo, luego de realizar la pruebas cinemáticas en busca de más criterios de falla, se considera que lo apropiado es mantener el resultado de RMR y hacer pruebas geológico

estructurales para determinar los tipos de rotura posible considerando todas las familias de discontinuidades y la orientación del talud. Debido a que el SMR considera únicamente la familia principal de discontinuidad y las fallas por vuelco y planar únicamente.

Aun ingresando más familias al análisis, los resultados podrían ser confusos al tener varias valoraciones, por lo que podría ser más conveniente un análisis separado del talud. Lo que es evidente es la importancia de realizar estos análisis y no conformarse únicamente con la valoración RMR u otra.

5.5. Ángulos de corte recomendados

Con las herramientas utilizadas para este estudio es posible hacer recomendaciones de ángulos de inclinación y orientaciones de talud para minimizar el riesgo de caída de bloques. Aunque se hacen recomendaciones, análisis de estabilidad detallados se deben de realizar para cada talud, con el fin de utilizar una relación seguridad-costos aceptable.

La base del siguiente análisis está en el análisis cinemático realizado, el cual utiliza el ángulo de fricción del material y las familias de discontinuidades, ambos factores junto con la geometría del talud indican si es estable o no y la forma de rotura que podría darse.

La recomendación inicial del ángulo de inclinación de talud es: utilizar aquel ángulo que iguale o sea menor al ángulo de fricción de la roca, debido a que el movimiento no será promovido si el ángulo de reposo del bloque sobre la superficie, no excede el ángulo de fricción del material.

Los ángulos de talud estable, según ángulo de fricción son: esquisto 29, granito 38, flujos de basalto 35, conglomerado y arenisca 35, depósitos pomáceos y vulcano-sedimentarios 40. Para la utilización de ángulos mayores se debe tomar en cuenta la orientación del talud y las familias mayores de discontinuidades. Por lo anterior sólo las familias con inclinación mayor al ángulo de fricción se analizan.

Para la falla planar la condiciones establecidas son: 1) el ángulo de fricción debe ser menor al de la discontinuidad, 2) la dirección de inclinación del talud y de la familia de discontinuidades no debe variar más de 20 grados.

Las cuñas susceptibles a fallar son las que tienen inmersión de unión de planos mayor al ángulo de fricción.

La rotura por vuelco se podría generar cuando 1) la dirección de inclinación de la familia de discontinuidades es contraria la dirección de inclinación del talud y su diferencia es igual o menor a 20 grados 2) la inmersión del polo de la familia de discontinuidad, es menor que el ángulo de fricción.

Tener en cuenta las restricciones anteriores, se interpreta la figura 42 donde se representan las direcciones de inclinación en las cuales los taludes son inestables. Los cuadros rojos en la figura 42 indican familias muy repetitivas como estratificaciones y foliaciones.

5.6. Estabilización de taludes

A continuación se describen algunas técnicas utilizadas para estabilizar taludes, cada solución se aplica dependiendo de las condiciones puntuales de cada talud, de los recursos que se disponen y el factor de seguridad que se desea alcanzar. Se hace una descripción breve, debido a lo complejo del tema, dependiendo del método seleccionado.

Entre las soluciones que se han descrito para estabilizar taludes de roca están (Andrew, Bartingale, & Hume, 2011): 1) alteración de la geometría del talud, 2) sistema de refuerzo o fortificación, 3) sistema de drenaje, y por último, cuando las condiciones lo permiten 4) protección contra caída de rocas.

La alteración de la geometría del talud, es el cambio de inclinación, orientación, cantidad de bermas y altura de talud; con el fin de estabilizarlo. Como se vio en el apartado 5.5, la orientación e inclinación del talud puede determinar si es estable o no. Además, siguiendo los ejemplos de la mecánica de suelos, la variación de la geometría puede estabilizar un talud y podría ser la solución más económica.

En la alteración de la geometría del talud también se debe tener en cuenta el método de excavación, si no se realiza de manera adecuada puede dañar el macizo rocoso. También como cambio de geometría está el saneo, que consiste en remover el material suelto e inestable dejando idealmente solo roca sana y estable.

En el sistema de refuerzo se encuentra con una variedad de técnicas. En general, las dividen en estabilización interna y externa. En la primera, se fortalece

el macizo rocoso al incrementar la resistencia al esfuerzo de corte y el movimiento a lo largo de las fracturas, ejemplo de ello son los pernos o bulones y los cables.

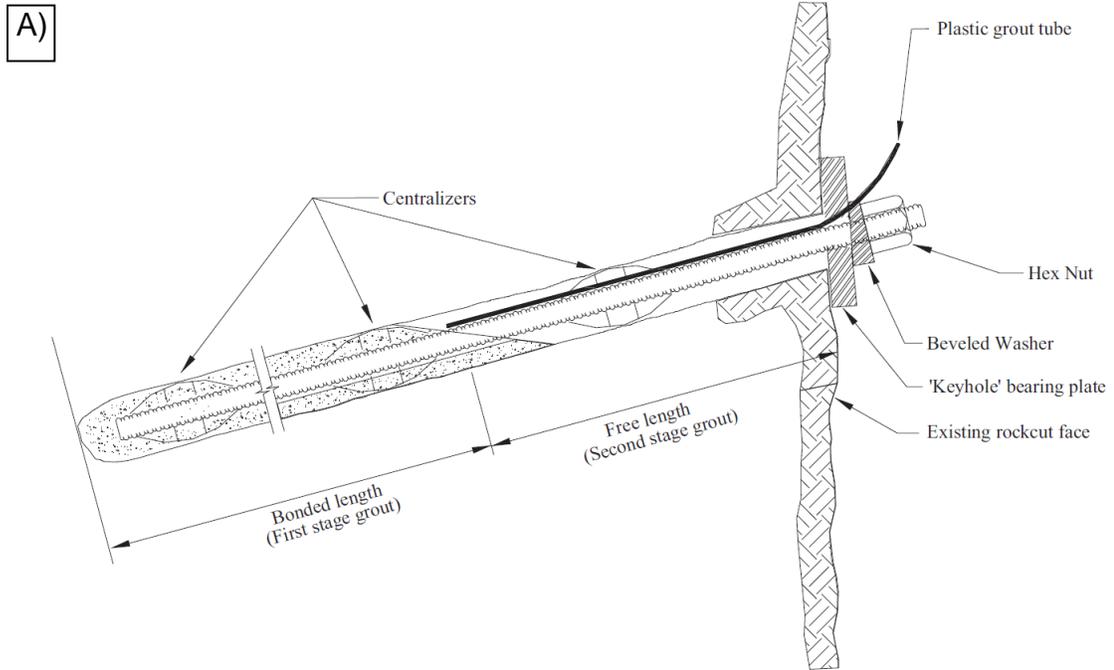
Un ejemplo común de la utilización de pernos es el sostenimiento de cuñas (Figura 43 A), para lo cual las dimensiones se determinan utilizando los análisis cinemáticos y la geometría del talud. Con el tamaño del bloque a sostener se establece la longitud de los pernos y la cantidad necesaria para sostener el bloque con un factor de seguridad adecuado.

En la estabilización externa (Figura 43 B), se protege de la erosión y meteorización de la roca, además de agregar un pequeño refuerzo estructural. Entre los métodos se puede mencionar las mallas, el concreto lanzado y geotextiles.

El sistema de drenaje es importante para mejorar la estabilidad debido a que el agua promueve el movimiento de bloques al incrementar la presión de poro en las grietas y disminuir el esfuerzo de corte en las discontinuidades. Soluciones deben ser estudiadas para un manejo de la escorrentía.

La protección contra caída de roca (Figura 43 C) se utiliza para proteger la zona habitada o transitada contra la caída de rocas, para el análisis se consideran las propiedades elásticas de las rocas, se determina el rebote y desplazamiento desde los posibles puntos origen. Con los datos mencionados anteriormente y la geometría del talud, se modelan escenarios y diseñan las soluciones.

Figura 43. Ejemplos de soluciones de estabilidad. A) Ejemplo de perno, B) Concreto lanzado y malla C) protección contra caída de rocas



Fuente: Tomado de (Andrew, Bartingale, & Hume, 2011).

CONCLUSIONES

1. La valoración de la calidad de roca (SMR) indica que la mayoría de taludes tienen clasificación regular a muy buena.
2. La distribución espacial de los datos utilizados para la clasificación es útil para caracterizar las zonas con menor calidad de roca, tal es el caso de la zona norte, donde afloran los esquistos que en general son las rocas con menor calidad de roca.
3. Los análisis por medio de estereogramas son útiles para visualizar en tres dimensiones, las distribuciones estadísticas de las discontinuidades, para hacer análisis de estabilidad. Las foliaciones y estratificaciones son tendencias bien marcadas identificadas por estos medios.
4. Se valida la hipótesis, pues en las rocas estudiadas la característica dominante para la determinación de zonas con baja calidad es el grado de afectación tectónica; en estas zonas el RQD es más bajo (menor a 25%), la cantidad de discontinuidades y familias de discontinuidades es mayor. Además de lo anterior pueden ser zonas más alteradas por acción hidrotermal o por la meteorización que minimiza su resistencia.

5. Por la experiencia de aplicación de los métodos RMR y SMR, se considera como mejor alternativa por el autor, la utilización del RMR y la evaluación de roturas en macizos rocosos, mediante métodos geológico estructurales con análisis cinemáticos.

6. Los taludes estudiados en su mayoría corresponden a roca, sin embargo, cuando la roca está muy alterada o fracturada se debe considerar analizar la estabilidad por medios de mecánica de suelos.

RECOMENDACIONES

1. En muchos casos, se estudian los taludes como suelos aún cuando son predominantemente roca, se debe considerar en qué momento se aplican los métodos de mecánica de suelos o mecánica de rocas. Se debe recordar que los suelos se estudian como medios continuos y a la roca la afectan discontinuidades, existen algunos parámetros como los listados en la sección 5.2 para diferenciar entre ambos materiales, pero en general cuando el macizo está triturado y se asemeja más a un medio continuo se debería estudiar de esta forma.
2. Después de realizar la presente investigación, se considera como método rápido, para determinación de taludes inestables, lo siguiente:
 - Determinar el RMR clásico de los taludes.
 - En zonas con RMR muy bajo considerar aplicar mecánica de suelos.
 - Determinar el GSI y tomar datos para la clasificación de Hoek-Brown entre otros datos estimar resistencia y ángulo de fricción.
 - Analizar modos de rotura en macizos rocosos por geología estructural.
3. Posterior al análisis de estabilidad considerar los métodos de estabilización, algunos mecanismos podrían ser:
 - Reconfiguración de la geometría del talud, cambio de inclinaciones, altura de banco y ancho de berma
 - Reforzamiento por medio de anclajes pasivos o activos.
 - Colocación de mallas y utilización de concreto lanzado (shotcrete).
 - Diseño y construcción de drenajes para evitar la acción del agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrew, R., Bartingale, R., & Hume, H. (2011). Context Sensitive Rock Slope Design Solutions. Denver: Federal Highway Administration.

Armas Zagoya, J. M. (2004). *Cartografía geológica estructural del valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera Rumbo Nuevo, Tamps., México*. Linares, N.L.: Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado el 12 de febrero de 2014, de http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020149840/1020149840_05.pdf

Authemayou, C., Brocard, G., Teyssier, C., Simon-Labric, T., Gutiérrez, A., Chiquín, E. N., & Morán, S. (2011). The Caribbean-North America-cocos Triple Junction and the dynamics of the Polochic-Motagua fault systems: Pull-up and zipper models. *TECTONICS*, 30, 23.

Bañon Blázquez, L. (2010). *sirio.ua.es*. Recuperado el 2013 de septiembre de 2013, de Manual de carreteras: http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010302.pdf

Bongiorno, F. (2010). *Web del Profesor*. Recuperado el 28 de septiembre de 2013, de Guia de geotécnia: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/frabon/Mecanica%20de%20Rocas/Guia%201%20geotecnia.pdf>

Caal Caal, C. D. (2013). *Estudio geotécnico de macizos rocosos ubicados sobre la carretera AV-29, San Antonio Senahú, Alta Verapaz*. Cobán: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Caballero Miranda, C. (2010). *UNAM Geofísica*. Recuperado el 20 de febrero de 2014, de <http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/cursos/brujula2.pdf>

CASTEM. (2013). *CASTEM*. Recuperado el 28 de 09 de 2013, de Clasificacion de rocas: <http://www.castem.com.pe/clasificacion-de-rocas.pdf>

Corodiminas, J., Hürlimann, M., & Doménech, G. (2013). *Universidad de Politecnica de Cataluña*. Recuperado el 1 de octubre de 2013, de http://www2.etcg.upc.edu/asg/engeol/pdf_files/5.3clasgeom_txt.pdf

Corominas, J., Hürlimann, M., & Doménech, G. (2013). *Universidad Politécnica de Cataluña*. Recuperado el 20 de febreo de 2014, de http://www2.etcg.upc.edu/asg/engeol/pdf_files/curs11_12/Tema5.pdf

Cosillo Pinto, A. (1999). *Consideraciones geológico-geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Delgado Martín, J., Padilla Benítez, F., & Barrientos, V. (octubre de 2010). *Universidad de Coruña*. Recuperado el 20 de febrero de 2014, de http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/113/pdfs/Practicas%20de%20GEOLOGIA.pdf

DeMets, C., Jansma, P. E., Mattioli, G. S., Dixon, T. H., Farina, F., Bilham, R., . . . Mann, P. (2000). GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion. *Geophysical Reserch Letters*, Vol. 27(No. 3), 437-440.

- Donnelly, T., Horney, G., Finch, R., & López Ramos, E. (1990). North Central America: The Mayan and Chortis Blocks. *The Geology of North America Vol. H. The Caribbean Region*, 39.
- Duque Escobar, G. (s.f.). *GALEON*. Recuperado el 12 de febrero de 2014, de Manual de geología para ingenieros: <http://www.galeon.com/manualgeo/geo16.pdf>
- Edeso Fito, J. M., Marauri, P., & Merino, A. (1995). Aplicaciones de los sistemas de información geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: El mapa sintético de riesgos potenciales y el de erosión. *Lurralde*, 257-291.
- Gómez Delgado, M. (2007). *Universidad de Alcalá*. Recuperado el 1 de octubre de 2013, de https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200388/TAB42351/emc_08.pdf
- González de Vallejo, L. (2003). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Griem, W. (2006). *Apuntes Geología Estructural*. Recuperado el 10 de 5 de 2014, de Geología Estructural: Practica roseta de diaclasas: <http://www.geovirtual.cl/Geoestructural/prak03.htm>
- Gumiel, P., Monteserín, V., Ferrero, A., Bellido, F., Baltuille, J., & Vivar, V. (2006). Aplicación del análisis geométrico de fracturas a la determinación de bloques en las canteras de granito de O Porriño, Pontevedra (NO España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3-25.

Gutiérrez, A. E., & Martens, U. (2007). *Proveniencia de la Formación Subinal, Guatemala central, basado en conteos de cláustos en conglomerados*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario del Norte.

Hoek, E. (2007). *Rocscience*. Recuperado el 1 de octubre de 2013, de http://www.rocscience.com/education/hoeks_corner

Instituto Geográfico Nacional. (1980). Mapa Geológico de Sanarate 1:50,000. Guatemala: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1993). *Manual de Ingeniería Geológica*. Madrid: Ministerio de Industria y Energía.

Irigary, C., Fernández, T., & Chacón, J. (2003). Preliminary Rock-Slope-Susceptibility Assessment Using GIS and the SMR Classification. *Natural Hazards*, 309-324. Obtenido de http://www.researchgate.net/publication/226408004_Preliminary_Rock-Slope-Susceptibility_Assessment_Using_GIS_and_the_SMR_Classification/file/79e41512249fedcbdc.pdf

Koch, A. J., & McLean, H. (1975). Pleistocene Tephra and Ash-Flow Deposits in the Volcanic Highlands of Guatemala. *Geological Society of America Bulletin*, 529-541.

Lawrence, D. P. (1975). *PETROLOGY AND STRUCTURAL GEOLOGY OF THE SANARATE - EL PROGRESO AREA, GUATEMALA*. Binghamtom: State University of New York at Binghamtom.

- Marcuzzi, J., & Cerusico, L. (2009). Universidad Católica de Salta. *Cuadernos de la Facultad*, 39-61. Recuperado el 2013 de septiembre de 28, de <http://www.ucasal.net/htm/ingenieria/cuadernos/archivos/4-p39-Marcuzzi.pdf>
- Marinos, P., & Hoek, E. (2009). GSI: A Geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *National Technical University of Athens*, 1-19.
- Martens, U. (2010). *Geotectónica de Guatemala*. Antigua Guatemala: X Congreso Geológico de América Central .
- McClay, K. (1987). *The mapping of geological structures*. Baffins Lane: John Wiley & Sons.
- Melentijevic, S. (2005). *Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Morales Cárdenas, M. O. (2009). *Caracterización Geotécnica y Determinación de Ángulos de Talud en Yacimiento Franke*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Ortega Obregon, C. (2005). *Caracterización estructural, petrológica y geoquímica de la zona de cizalla "Baja Verapaz", Guatemala*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L., Solé, J., Martens, U., Tuena, A. G., Morán-Ical, S., . . . Ortega-Obregón, C. (2004). Polyphase, High-Temperature Eclogite-Facies Metamorphism in the Chuacús Complex, Central Guatemala: Petrology, Geochronology, and Tectonic Implications. *International Geology Review*, 46, 225-470.
- Pérez Bol, E. (1995). *Lexico estratigráfico del bloque Chortis*. Coban, A.V., Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- R. Tomas, J. D. (2009). Propuesta metodológica para la aplicación del Slope Mass Rating continuo (SMR-C) mediante un sistema de informacion Geografica. *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 12.
- R. Tomás, M. C. (2006). Nuevas funciones continuas para el cálculo del Slope Mass Rating (SMR): Aplicación mediante un sistema de informacion geográfico a los taludes rocos de una cantera. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 87-97.
- Rajapakse, R. (2008). *Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb*. Burlington, MA: Elsevier Inc.
- Rockscience. (27 de 08 de 2016). *www.rocscience.com*. Obtenido de https://www.rocscience.com/help/examine2d/webhelp/examine2d/Strength_Properties.htm
- Sánchez, M. (2012). *Universidad Politecnica de Cataluña*. Recuperado el 12 de febrero de 2014, de El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6215/1/00.pdf>

- Tomás Jover, R., Ferreiro Prieto, I., Sentana Gadea, I., & Díaz Ivorra, C. (2002). Aplicaciones de la proyección estereográfica en ingeniería geológica. *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, 1-10.
- Tomás, R., Cuenca, A., Cano, M., & García-Barba, J. (2012). A graphical approach for slope mass rating (RMR). *ELSEVIER, Engineering Geology*, 67-76.
- Tomás, R., Delgado, J., & Cuenca, A. (2013). *ingegraf*. Recuperado el 04 de febrero de 2014, de <http://www.ingegraf.es/mesas/COMUNICACIONES%20ACEPTADAS/T3.pdf>
- Ucar Navarro, R. (2010). *Web del profesor*. Recuperado el 20 de febrero de 2014, de [Manual de Anclajes: http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/frabon/Mecanica%20de%20Rocas/CAP%20II%20%20MANUAL%20DE%20ANCLAJES.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/frabon/Mecanica%20de%20Rocas/CAP%20II%20%20MANUAL%20DE%20ANCLAJES.pdf)
- Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA)-Programa de Emergencia por Desastres Naturales (MAGA-BID). (2001). *Mapa Fisiográfico-Geomorfológico de la República de Guatemala, a escala 1:250,000 Memoria Técnica*. Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
- Villacorta, & Quispe. (2006). *COOPI*. Recuperado el 04 de febrero de 2014, de <http://coopi.org/repository/movimientos.en.masa.pdf>
- Yoon, W., Jeong, U., & Kim, J. (2002). Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes. *ELSEVIER, Engineering Geology*, 51-61.

ANEXOS

ANEXO 1. DATOS ESTRUCTURALES

FALLAS

DIP	DIRECTION	DIP	ESTACION	GRUPO
188	85	6	1	
354	90	2.2	1	
25	65	6.2	1	
330	20	1	2	
215	35	3	2	
5	85	3	2	
0	75	5	2	
355	60	5	2	
20	60	7	2	
18	80	7	2	
60	40	8	2	
285	50	8	2	
285	60	8	2	
115	51	9	2	
80	20	9	2	
15	83	3.2	2	
290	79	9.2	2	

ESTRATIFICACIÓN

DIP	DIRECTION	DIP	ESTACION	DIA
255	15	1	1	
60	35	4	1	
330	40	3	2	
75	54	7	2	
92	48	8	2	

FOLIACIÓN

DIP	DIRECTION	DIP	ESTACION	GRUPO
21	60	6.2	1	
70	40	1	2	
45	20	1	2	
20	50	1	2	
20	15	2	2	
20	65	2	2	
50	8	2	2	

270	20	6	2
270	19	6	2
271	20	6	2
270	21	6	2
272	20	6	2
269	20	6	2
268	20	6	2
270	20	6	2
25	65	9	2
300	65	92	2
300	66	92	2
301	67	92	2
302	68	92	2
303	69	92	2
304	70	92	2
305	71	92	2
306	72	92	2
307	73	92	2
308	74	92	2
295	75	92	2
296	65	92	2
297	66	92	2
298	67	92	2
299	68	92	2
300	69	92	2
301	70	92	2
302	71	92	2
303	72	92	2
300	73	92	2
300	74	92	2
300	75	92	2
300	76	92	2
300	70	92	2
295	70	92	2
296	70	92	2
297	70	92	2
298	70	92	2
300	70	92	2
300	69	92	2
299	70	92	2
300	71	92	2
300	70	92	2
325	55	2.2	2

295	12	3.2	2
285	20	9.2	2
30	40	9.2	2

FRACTURAS

DIP DIRECTION	DIP	ESTACION	GRUPO
140	45	3	1
210	75	3	1
100	35	3	1
25	80	3	1
45	45	3	1
85	52	3	1
84	52	3	1
85	53	3	1
86	51	3	1
265	55	3	1
266	54	3	1
264	55	3	1
250	25	3	1
55	60	4	1
325	60	4	1
235	20	4	1
260	80	5	1
259	81	5	1
261	79	5	1
258	80	5	1
310	50	5	1
311	49	5	1
309	51	5	1
311	50	5	1
310	51	5	1
298	62	5	1
299	62	5	1
298	61	5	1
95	55	5	1
145	50	5	1
144	51	5	1
143	52	5	1
145	53	5	1
145	54	5	1
145	49	5	1

142	48	5	1
143	47	5	1
146	49	5	1
147	49	5	1
145	50	5	1
145	51	5	1
0	80	5	1
0	81	5	1
0	79	5	1
1	80	5	1
2	80	5	1
3	80	5	1
359	81	5	1
358	80	5	1
359	82	5	1
60	35	7	1
59	35	7	1
61	35	7	1
60	34	7	1
175	75	7	1
132	65	7	1
131	65	7	1
133	65	7	1
132	63	7	1
129	65	7	1
129	66	7	1
132	64	7	1
15	30	7	1
14	30	7	1
13	30	7	1
14	30	7	1
15	30	7	1
15	31	7	1
15	29	7	1
160	70	7	1
160	69	7	1
161	70	7	1
160	71	7	1
159	70	7	1
140	50	7	1
140	51	7	1
140	52	7	1
139	50	7	1

145	60	7	1
145	59	7	1
144	60	7	1
143	60	7	1
145	61	7	1
350	71	8	1
349	70	8	1
352	73	8	1
300	35	5.2	1
300	34	5.2	1
299	36	5.2	1
335	75	5.2	1
352	45	5.2	1
351	44	5.2	1
353	43	5.2	1
352	46	5.2	1
28	58	5.2	1
27	57	5.2	1
30	58	5.2	1
105	57	5.2	1
275	40	5.2	1
5	55	5.2	1
170	76	5.2	1
170	75	5.2	1
170	74	5.2	1
272	76	5.2	1
172	76	5.2	1
170	75	5.2	1
169	75	5.2	1
260	38	5.2	1
260	39	5.2	1
260	37	5.2	1
261	38	5.2	1
259	38	5.2	1
120	85	6.2	1
119	84	6.2	1
118	83	6.2	1
120	86	6.2	1
121	86	6.2	1
120	85	6.2	1
123	85	6.2	1
121	85	6.2	1
120	75	6.2	1

26	65	6.2	1
24	66	6.2	1
25	64	6.2	1
356	70	6.3	1
355	70	6.3	1
356	69	6.3	1
15	80	6.3	1
15	81	6.3	1
15	79	6.3	1
17	80	6.3	1
16	80	6.3	1
12	80	6.3	1
13	80	6.3	1
14	80	6.3	1
15	77	6.3	1
15	78	6.3	1
15	79	6.3	1
255	38	6.3	1
255	37	6.3	1
254	38	6.3	1
105	55	6.3	1
105	54	6.3	1
105	56	6.3	1
104	55	6.3	1
106	55	6.3	1
104	55	6.3	1
105	56	6.3	1
105	54	6.3	1
280	35	8.2	1
190	35	1	2
160	60	1	2
16	82	1	2
355	65	1	2
215	67	2	2
215	67	2	2
215	68	2	2
214	67	2	2
215	66	2	2
280	60	2	2
280	59	2	2
280	58	2	2
280	61	2	2
280	62	2	2

281	60	2	2
282	60	2	2
279	60	2	2
278	60	2	2
320	72	2	2
320	71	2	2
320	72	2	2
319	72	2	2
242	60	3	2
241	61	3	2
243	60	3	2
241	59	3	2
170	58	3	2
170	59	3	2
170	60	3	2
170	57	3	2
168	56	3	2
169	58	3	2
200	35	3	2
202	34	3	2
200	33	3	2
200	36	3	2
199	36	3	2
201	35	3	2
340	67	3	2
340	68	3	2
340	69	3	2
340	66	3	2
340	65	3	2
340	64	3	2
341	67	3	2
138	57	5	2
138	58	5	2
138	59	5	2
139	57	5	2
138	57	5	2
140	53	5	2
140	52	5	2
140	54	5	2
139	53	5	2
141	53	5	2
80	40	5	2
80	39	5	2

80	41	5	2
79	40	5	2
254	40	5	2
254	39	5	2
255	40	5	2
116	30	5	2
116	29	5	2
115	30	5	2
117	30	5	2
355	75	6	2
355	74	6	2
355	76	6	2
354	75	6	2
356	75	6	2
70	11	6	2
70	10	6	2
70	12	6	2
69	11	6	2
71	11	6	2
10	75	6	2
10	74	6	2
11	75	6	2
260	15	6	2
260	14	6	2
20	31	6	2
20	30	6	2
19	31	6	2
21	31	6	2
85	73	6	2
85	72	6	2
61	60	7	2
61	59	7	2
296	38	7	2
296	39	7	2
295	37	7	2
255	35	7	2
255	34	7	2
255	36	7	2
255	36	7	2
254	35	7	2
256	35	7	2
254	34	7	2
255	36	7	2

253	35	7	2
270	50	7	2
270	49	7	2
269	50	7	2
121	55	7	2
121	54	7	2
121	56	7	2
120	55	7	2
122	55	7	2
15	40	8	2
15	39	8	2
14	40	8	2
115	90	8	2
115	89	8	2
114	90	8	2
115	89	8	2
114	90	8	2
260	50	8	2
260	49	8	2
260	48	8	2
260	51	8	2
260	52	8	2
359	50	8	2
0	50	8	2
270	35	8	2
269	35	8	2
270	34	8	2
270	36	8	2
25	38	8	2
25	39	8	2
25	40	8	2
26	38	8	2
280	28	8	2
280	27	8	2
280	29	8	2
280	26	8	2
280	25	8	2
279	28	8	2
281	28	8	2
282	28	8	2
130	45	8	2
130	44	8	2
130	46	8	2

129	45	8	2
131	45	8	2
240	35	8	2
239	35	8	2
50	65	8	2
50	64	8	2
50	66	8	2
51	64	8	2
49	66	8	2
50	66	8	2
51	65	8	2
49	65	8	2
150	80	9	2
150	79	9	2
151	80	9	2
195	70	9	2
195	71	9	2
196	70	9	2
194	70	9	2
195	69	9	2
195	68	9	2
194	70	9	2
196	70	9	2
195	71	9	2
197	69	9	2
193	70	9	2
157	60	9	2
157	59	9	2
157	58	9	2
156	60	9	2
158	60	9	2
157	61	9	2
157	62	9	2
157	63	9	2
156	60	9	2
155	60	9	2
154	61	9	2
235	67	10	2
236	67	10	2
237	67	10	2
238	67	10	2
239	67	10	2
240	67	10	2

241	67	10	2
242	67	10	2
243	67	10	2
244	67	10	2
245	67	10	2
246	67	10	2
247	67	10	2
248	67	10	2
249	67	10	2
240	60	10	2
240	61	10	2
240	62	10	2
240	63	10	2
240	64	10	2
240	65	10	2
240	66	10	2
240	67	10	2
240	68	10	2
240	69	10	2
240	70	10	2
240	71	10	2
240	67	10	2
239	67	10	2
240	68	10	2
140	50	10	2
140	51	10	2
140	52	10	2
140	53	10	2
140	49	10	2
140	48	10	2
140	47	10	2
139	50	10	2
141	50	10	2
140	50	10	2
335	35	10	2
335	34	10	2
335	36	10	2
334	35	10	2
336	35	10	2
240	55	11	2
240	56	11	2
240	57	11	2
240	58	11	2

240	59	11	2
240	60	11	2
240	61	11	2
240	62	11	2
240	63	11	2
240	64	11	2
240	65	11	2
235	62	11	2
236	62	11	2
237	62	11	2
238	62	11	2
239	62	11	2
240	62	11	2
241	62	11	2
242	62	11	2
243	62	11	2
244	62	11	2
245	62	11	2
246	62	11	2
240	55	11	2
240	56	11	2
244	57	11	2
245	58	11	2
246	62	11	2
240	62	11	2
240	62	11	2
225	32	11	2
225	33	11	2
225	34	11	2
225	35	11	2
225	36	11	2
225	37	11	2
225	38	11	2
225	39	11	2
220	37	11	2
221	37	11	2
222	37	11	2
223	37	11	2
225	37	11	2
225	37	11	2
195	85	11	2
195	86	11	2
195	87	11	2

195	88	11	2
195	89	11	2
195	90	11	2
190	90	11	2
191	90	11	2
192	90	11	2
193	90	11	2
195	90	11	2
195	57	11	2
195	56	11	2
195	58	11	2
194	57	11	2
110	62	2.2	2
110	63	2.2	2
110	64	2.2	2
105	64	2.2	2
106	64	2.2	2
110	64	2.2	2
160	50	2.2	2
160	51	2.2	2
160	49	2.2	2
161	50	2.2	2
170	80	2.2	2
55	70	3.2	2
54	69	3.2	2
55	71	3.2	2
50	86	3.2	2
200	67	5.3	2
204	66	5.3	2
200	68	5.3	2
202	69	5.3	2
200	65	5.3	2
201	67	5.3	2
5	52	5.3	2
6	52	5.3	2
5	51	5.3	2
180	50	5.3	2
180	51	5.3	2
181	50	5.3	2
180	49	5.3	2
180	48	5.3	2
180	50	5.3	2
179	50	5.3	2

178	50	5.3	2
179	51	5.3	2
170	56	9.2	2
171	56	9.2	2
169	56	9.2	2
170	54	9.2	2
170	55	9.2	2
250	65	9.2	2
250	66	9.2	2
250	64	9.2	2
250	67	9.2	2
251	65	9.2	2
249	65	9.2	2
170	80	9.2	2
170	79	9.2	2
170	81	9.2	2
170	82	9.2	2
170	78	9.2	2
169	80	9.2	2
230	40	9.2	2
230	39	9.2	2
230	41	9.2	2
229	40	9.2	2
231	40	9.2	2
285	67	11.2	2
285	65	11.2	2
285	66	11.2	2
285	68	11.2	2
285	69	11.2	2
284	67	11.2	2
286	67	11.2	2
284	67	11.2	2
220	35	11.2	2
220	33	11.2	2
220	34	11.2	2
220	36	11.2	2
220	37	11.2	2
219	35	11.2	2
221	35	11.2	2
205	45	11.2	2
205	44	11.2	2
205	46	11.2	2
204	45	11.2	2

0	67	11.2	2
359	66	11.2	2
3	65	11.2	2
2	68	11.2	2
1	67	11.2	2
80	20	11.2	2
80	19	11.2	2
80	18	11.2	2
81	20	11.2	2

Anexo 2

Coordenadas de estaciones.

Estación	X	Y
1-1	784979	1630691
1-2	785406	1630944
1-22	785406	1630944
1-3	785513	1631026
1-4	786146	1631190
1-42	786218	1631114
1-5	785312	1631112
1-52	786352	1631145
1-6	786359	1631401
1-62	786402	1631581
1-7	786966	1631488
1-72	787388	1631085
1-7.1	786936	1631660
1-8	787607	1631583
1-82	787616	1631550
2-1	788466	1631856
2-2	788103	1632906
2-22	788139	1632962
2-3	788244	1633069
2-5	788378	1633655
2-52	788389	1633706
2-6	788616	1633957
2-7	788881	1634376
2-8	789086	1634388
2-82	789295	1634390
2-9	789464	1634766
2-92	789517	1634674
2-91	789773	1635185
2-10	789914	1635245
2-11	790232	1635696
2-11 2	790327	1635740

Datum: WGS 84 Zona 15 N