



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE MACIZO ROCOSO
MEDIANTE FOTOGAMETRÍA DIGITAL: APLICACIÓN EN LA QUEBRADA LO
CAÑAS, REGIÓN METROPOLITANA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

CARMEN PAZ MUÑOZ SANTELICES

PROFESORA GUÍA:

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARISOL LARA CASTILLO

ALEX GARCÉS CATALÁN

SANTIAGO DE CHILE

2024

METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE MACIZO ROCOSO MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL: APLICACIÓN EN LA QUEBRADA LO CAÑAS, REGIÓN METROPOLITANA

La clasificación geotécnica de macizo rocoso es esencial para evaluar su comportamiento frente a cambios en los esfuerzos. Para ello, se necesita conocer las características de la roca y de las discontinuidades, tradicionalmente obtenidas en terreno. Dado que a veces no es posible acceder a la zona de estudio, es fundamental encontrar alternativas para una clasificación efectiva de macizo rocoso de forma remota.

En este trabajo se desarrolla una metodología para la clasificación geotécnica de macizo rocoso según *Rock Mass Rating* (RMR) (Bieniawski, 1989) y *Geological Strength Index* (GSI) (Marinos & Hoek, 2000) mediante fotogrametría digital, aplicable a cualquier tipo de macizo rocoso (natural o intervenido). Consta de cuatro etapas: selección del área de estudio y recopilación de datos previos; captura de fotografías para construir una nube de puntos 3D; análisis estructural con *Discontinuity Set Extractor* (DSE); y levantamiento de información geotécnica para la clasificación del macizo rocoso.

La metodología se aplicó en un afloramiento de la quebrada Lo Cañas, en la comuna de La Florida, Región Metropolitana. El RQD o *Rock Quality Designation*, necesario para la evaluación del RMR no pudo ser obtenido directamente debido a la resolución de la nube de puntos, lo mismo que la apertura, rugosidad y relleno de las discontinuidades, por lo que se utilizaron rangos de variación obtenidos con bibliografía y a partir de la relación de estos parámetros con el GSI.

Los resultados del RMR, considerando la condición de discontinuidades obtenida a partir del GSI, muestran valores bastante similares a los obtenidos estimando la condición de discontinuidades a partir de bibliografía y observaciones. El GSI se debe trabajar en rangos adecuados a la resolución de la nube de puntos, priorizando un enfoque conservador para no sobreestimar la calidad del macizo rocoso.

Esta metodología presenta varias ventajas sobre los métodos convencionales: mejora la seguridad, alcance de zonas inaccesibles, visualización del macizo rocoso desde distintos ángulos, entre otras. La principal limitación es que la resolución centimétrica de las imágenes no permite determinar todos los parámetros para la clasificación de macizo rocoso, perdiendo precisión en comparación a métodos convencionales. La aplicación de esta metodología muestra que corresponde a una técnica efectiva para la clasificación de macizo rocoso, siempre y cuando se tengan en cuenta sus limitaciones.

“Ser delulu es la solulu”

- Ni tan Distintas

*A la Pacita, que no
sabía qué estudiar...*

AGRADECIMIENTOS

A mis papás y mi hermano, muchas gracias por apoyarme, por la preocupación, por el cariño y por darme los medios para llegar hasta aquí. Aunque no se los diga tan seguido, los amo.

A mi tremenda profesora guía: Sofía Rebolledo, gracias por todo, pero especialmente por ser tan buena persona, por el cariño, la paciencia y la confianza. También, a mi profesora co-guía: Marisol Lara, una gran persona más allá de lo académico. Sin duda, ambas son un ejemplo a seguir y fue un placer que hayan sido ustedes las que me guiaron en este proceso. Igualmente, agradezco a Alex Garcés por formar parte de mi comisión, por la buena disposición a resolver mis dudas y por las fotografías que sirvieron de base para este trabajo.

A mis amigas Joji, Cata, Manne, Coni y Kei. A pesar de que nos hicimos cercanas casi terminando la carrera, sin ustedes no habría sido lo mismo. Mil gracias por el apañe en esas noches de estudio, por los consejos de vida y los chismecitos. Son la amistad más bonita que me llevo de la U, las adoro!

A mi mejor amiga, Edda, que a pesar del tiempo y que no nos veamos tan seguido, siempre ha estado para apoyarme y darme ánimo. Gracias por aguantar los audios eternos hablando cosas geológicas que probablemente no entendías. Son casi 20 años de amistad y espero que sean muchos más, te adoro!

A Daniel Reveco, un apoyo incondicional este último tiempo. Me has demostrado que en poco tiempo puedes hacer cambios en la vida de las personas. Muchas gracias por confiar en mí, incluso más de lo que yo misma lo hacía, por impulsarme a sacar mi mejor versión, por ayudarme y acompañarme cuando más lo necesitaba, y por quererme tan bonito. Te amo.

A todas las personas que fueron parte de este largo proceso, a los que fueron mis amigos en plan común y especialmente a la gente bonita con la que pude compartir en Geo (mención especial a Pauli E., Pauli C. y Fortu).

Por último, me agradezco a mí, por todo. Estoy orgullosa de lo que he logrado y sé que soy capaz de lograr grandes cosas.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.1.1	Objetivo general.....	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	METODOLOGÍA	2
2	MARCO TEÓRICO.....	3
2.1	CARACTERIZACIÓN DE MACIZO ROCOSO	3
2.1.1	Macizo rocoso.....	3
2.1.2	Sistemas de clasificación de macizo rocoso	3
2.1.2.1	RMR	3
2.1.2.2	GSI	6
2.1.2.3	Q.....	8
2.1.3	Análisis cinemático	13
2.1.3.1	Falla planar	13
2.1.3.2	Falla en cuña	14
2.1.3.3	Volcamiento (Toppling)	14
2.2	ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA FOTOGRAMETRÍA.....	16
2.2.1	Usos de la fotogrametría digital	16
2.2.1.1	Structure from Motion	17
2.3	PROGRAMAS DE PROCESAMIENTO DE NUBES DE PUNTOS 3D	17
2.3.1	Agisoft Metashape	17
2.3.2	CloudCompare.....	20
2.3.3	Discontinuity Set Extractor (DSE)	21
3	CONSTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA CLASIFICACIÓN REMOTA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL	24
3.1	LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN.....	26
3.1.1	Limitaciones del RMR.....	26
3.1.2	Limitaciones del GSI	27
3.1.3	Limitaciones del Q	29
3.2	PRIMERA ETAPA.....	29
3.3	SEGUNDA ETAPA	29

3.4	TERCERA ETAPA.....	30
3.5	CUARTA ETAPA.....	31
3.5.1	Ficha de levantamiento de datos	31
3.5.2	RMR con fotogrametría.....	34
3.5.2.1	Resistencia de la matriz rocosa	34
3.5.2.2	RQD.....	35
3.5.2.3	Espaciamiento entre las discontinuidades	36
3.5.2.4	Condición de las discontinuidades.....	37
3.5.2.5	Agua	38
3.5.3	GSI con fotogrametría.....	39
4	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA QUEBRADA LO CAÑAS, REGIÓN METROPOLITANA.....	40
4.1	PRIMERA ETAPA.....	40
4.1.1	Ubicación y accesos	40
4.1.2	Marco Geológico.....	42
4.1.2.1	Formación Abanico	42
4.1.3	Antecedentes geotécnicos	43
4.2	SEGUNDA ETAPA	45
4.2.1	Construcción de la nube de puntos.....	45
4.2.2	Descripción general y sectorización.....	46
4.3	TERCERA ETAPA.....	51
4.3.1	Obtención de sets de discontinuidades	51
4.3.2	Análisis cinemático	56
4.4	CUARTA ETAPA.....	59
4.4.1	Ficha de levantamiento de datos geotécnicos	59
4.4.2	Cálculo de RMR.....	59
4.4.2.1	Resistencia de la matriz rocosa	59
4.4.2.2	RQD.....	60
4.4.2.3	Espaciamiento entre las discontinuidades	60
4.4.2.4	Condición de las discontinuidades.....	63
4.4.2.5	Agua	64
4.4.2.6	Resumen de los resultados	64

4.4.3	Cálculo de GSI.....	67
5	DISCUSIONES Y ANÁLISIS	69
5.1	SOBRE LA METODOLOGÍA.....	69
5.2	SOBRE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	72
6	CONCLUSIONES	77
6.1	RECOMENDACIONES.....	78
7	BIBLIOGRAFÍA	80
	ANEXOS	83
	ANEXO A.....	83
	ANEXO B.....	105

1 INTRODUCCIÓN

La clasificación de macizos rocosos es esencial para evaluar su comportamiento ante la modificación de esfuerzos y para determinar las medidas de mitigación necesarias al construir diversas obras de ingeniería, como taludes o túneles. También, es útil a la hora de estudiar acantilados u otras morfologías naturales que necesiten monitoreo o mantención para evitar accidentes.

Para clasificar un macizo rocoso es fundamental conocer las propiedades de la roca y en particular, de las discontinuidades. Para ello, se deben registrar distintos parámetros estructurales y geotécnicos como orientación, persistencia, continuidad, espaciamiento, apertura y relleno.

Usualmente, la recolección de la información necesaria se lleva a cabo *in situ*. Sin embargo, hay ocasiones en las que no es posible acercarse al sitio que se quiere estudiar, ya sea por seguridad o por falta de acceso. Además, la toma de datos en terreno puede verse perjudicada por condiciones climáticas adversas, impedimentos físicos o por falta de tiempo.

Teniendo en cuenta lo anterior, es crucial encontrar metodologías que optimicen la caracterización de macizo rocoso y que permitan el estudio estructural de forma remota, especialmente de zonas que representen un peligro para la integridad de los profesionales a cargo o que son de difícil (o nulo) acceso.

Actualmente, los avances tecnológicos han llevado a la generación de técnicas que facilitan el estudio de macizos rocosos remotamente. Uno de los enfoques más populares es la fotogrametría digital utilizando la técnica de *Structure from Motion (SfM)*, la cual permite obtener una nube de puntos 3D a partir de fotografías, pudiendo realizar caracterizaciones geotécnicas. Sin embargo, este método solo ha sido empleado para complementar la caracterización geotécnica realizada en terreno con métodos convencionales.

Bajo este contexto, se pretende elaborar una metodología que permita realizar una buena caracterización y clasificación de macizo rocoso de forma remota según distintos sistemas de clasificación, generando una nube de puntos 3D a partir de imágenes del macizo rocoso estudiado. A su vez, esta nube de puntos también podría servir para obtener una caracterización estructural lo suficientemente detallada que permita realizar un análisis cinemático del macizo rocoso estudiado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una metodología de clasificación de macizo rocoso utilizando fotogrametría digital, que sea aplicable a distintas zonas de estudio.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentro de los objetivos específicos de este trabajo se contempla:

- Definir las limitaciones de la clasificación de macizo rocoso de forma remota para cada sistema de clasificación (RMR (Bieniawski, 1989), GSI (Marinos & Hoek, 2000) y Q (Barton et al., 1974)).
- Aplicar la metodología elaborada a un afloramiento ubicado en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana, Chile.
- Realizar un análisis cinemático del afloramiento estudiado.

1.2 METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se divide en las siguientes etapas:

- Revisión bibliográfica: En primer lugar, enfocada en la historia de la fotogrametría, usos de la fotogrametría digital, requerimientos de la técnica *Structure from Motion*, casos en los que se haya aplicado la técnica *SfM*, estudio y selección de los sistemas de clasificación de macizo rocoso y los parámetros asociados a cada uno de ellos. Posteriormente, enfocada en la zona de estudio, específicamente para la obtención de datos geológicos y geotécnicos útiles para la clasificación de macizo rocoso.
- Elaboración de la metodología general de clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital aplicable a diversos casos.
- Aplicación de la metodología elaborada en un afloramiento de la quebrada Lo Cañas.
- Discusiones y conclusiones de la metodología y de los resultados obtenidos en su aplicación.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 CARACTERIZACIÓN DE MACIZO ROCOSO

2.1.1 Macizo rocoso

Un macizo rocoso corresponde al conjunto formado por una matriz rocosa (o “roca intacta”) y sus discontinuidades. Desde la geología, la matriz comprende la litología, composición mineralógica, fábrica, porosidad, permeabilidad y procesos de alteración y meteorización, mientras que las discontinuidades corresponden a las estructuras que separan los bloques de matriz (Gonzalez de Vallejo et al., 2002).

Al construir o excavar en macizos rocosos se modifican las condiciones iniciales a las cuales se encontraba sometido, pudiendo generarse deformación o ruptura, a nivel macroscópico y microscópico (Gonzalez de Vallejo et al., 2002). De acuerdo a lo anterior, los macizos rocosos son estudiados por la mecánica de rocas para determinar su comportamiento ante la acción de esfuerzos internos y externos.

2.1.2 Sistemas de clasificación de macizo rocoso

La clasificación de macizo rocoso se basa principalmente en parámetros observables en terreno de forma cualitativa. Por esto, es fundamental realizar una correcta interpretación de las características del afloramiento estudiado para obtener una buena clasificación.

Existen diversos sistemas de clasificación de macizo rocoso, siendo los más comunes: RMR, GSI y Q.

2.1.2.1 RMR

El RMR o *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989) indica el índice de calidad del macizo rocoso, según una escala de puntaje dado por la resistencia de la roca intacta, *Rock Quality Designation* (RQD), espaciamiento de las discontinuidades, condición de las discontinuidades y presencia de agua (Tabla 1 y Tabla 2).

Esta clasificación entrega un puntaje final de 0 a 100, con las siguientes clases:

- Clase I: 100-81 puntos, roca de muy buena calidad.
- Clase II: 80-61 puntos, roca de buena calidad.
- Clase III: 60-41 puntos, roca de calidad regular.
- Clase IV: 40-21 puntos, roca de mala calidad.
- Clase V: <21 puntos, roca de muy mala calidad.

Tabla 1: Clasificación geomecánica de macizos rocosos mediante Rock Mass Rating System. Adaptada de Bieniawski (1989)

A. Parámetros de clasificación y sus puntajes									
Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia de la matriz rocosa	Is	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para este rango de valores muy bajos se prefiere UCS		
		UCS	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puntaje	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%			
	Puntaje	20	17	13	8	3			
3	Espaciamiento de las discontinuidades	>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	Puntaje	20	15	10	8	5			
4	Condición de las discontinuidades (ver E)	Superficies muy rugosas, Discontinuas, Sin apertura, Paredes sin meteorización	Superficies levemente rugosas, Apertura <1 mm, Paredes levemente meteorizadas	Superficies levemente rugosas, Apertura <1 mm, Paredes altamente meteorizadas	Superficies pulidas o Relleno <5 mm de espesor o Apertura 1-5 mm, Continuas	Relleno blando >5 mm de espesor o Apertura >5 mm, Continuas			
		Puntaje	30	25	20	10	0		
5	Agua	Condiciones Generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteando	Fluyendo		
		Puntaje	15	10	7	4	0		

Tabla 2: Condición de las discontinuidades del Rock Mass Rating System. Adaptada de Bieniawski (1989)

E. Guía para la clasificación de la condición de las discontinuidades					
Largo de las discontinuidades (persistencia/continuidad)	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Puntaje	6	4	2	1	0
Apertura (separación)	Nula	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm
Puntaje	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosas	Rugosas	Levemente rugosas	Suaves	Pulidas
Puntaje	6	5	3	1	0
Relleno	Sin relleno	Duro <5 mm	Duro >5 mm	Blando <5 mm	Blando >5 mm
Puntaje	6	4	2	2	0
Meteorización	No meteorizadas	Levemente meteorizadas	Moderadamente meteorizadas	Altamente meteorizadas	Descompuestas
Puntaje	6	5	3	1	0

Dentro del RMR, se incluye el RQD o *Rock Quality Designation* (Deere & Deere, 1988) es la designación de calidad de la roca y corresponde al porcentaje de recuperación de tramos de testigo con largo mayor a 10 cm. Se calcula según la siguiente fórmula:

$$RQD = \frac{\sum t > 10}{L} * 100$$

Ecuación 1

Donde $t > 10$: tramos de testigo de largo mayor a 10 cm y L : largo total del testigo.

Por otro lado, en caso de no contar con sondajes, se puede hacer un estimado del RQD en función de las discontinuidades por metro cúbico (J_v), con la siguiente fórmula (Palmstrom, 2005):

$$RQD = 110 - 2,5 * J_v$$

Ecuación 2

Esta fórmula solo aplica para los casos donde se tiene un J_v entre 4 y 44. Para valores inferiores a 4, el RQD será 100% y valores mayores a 44 el RQD será de 0%.

El J_v representa la cantidad de discontinuidades presentes en 1 m^3 . Este valor puede ser calculado en función del espaciamiento medio de las discontinuidades de cada set:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}$$

Ecuación 3

Donde S_1 , S_2 y S_n corresponden al espaciamiento medio de las discontinuidades del set 1, set 2 y set n respectivamente. Cabe destacar que el inverso del espaciamiento medio de cada set corresponde a la frecuencia de discontinuidades en cada metro.

La escala de clasificación de calidad según RQD se divide en:

- <25%: muy mala calidad.
- 25-50%: mala calidad.
- 50-75%: calidad regular.
- 75-90%: buena calidad.
- 90-100%: excelente calidad.

2.1.2.2 GSI

El GSI o *Geological Strength Index* actual (Marinos & Hoek, 2000) corresponde al índice de esfuerzo geológico y entrega un estimado de la resistencia del macizo rocoso según las condiciones geológicas de la roca (Figura 1).

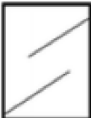





GSI para rocas fracturadas (Marinos & Hoek, 2000) A partir de la litología, estructura y condición de las superficies, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Establecer un rango de 33 a 37 es más realista que decir que GSI = 35. Notar que esta tabla no aplica para fallas controladas estructuralmente. Donde existan planos estructurales débiles de orientación desfavorable respecto a la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al cizalle de superficies en rocas propensas a ser alteradas por el cambio de humedad será reducida si hay presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de las categorías regular a muy mala, se deberá aplicar un ajuste hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de agua se trata mediante un análisis de estrés efectivo.		CONDICIÓN DE LAS SUPERFICIES					
ESTRUCTURAS		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA	
		Superficies muy rugosas, frescas y no meteorizadas	Superficies rugosas, levemente meteorizadas, con pátinas de oxidación	Superficies suaves, moderadamente meteorizadas y alteradas	Superficies pulidas, altamente meteorizadas con rellenos compactos o fragmentos angulares	Superficies pulidas, altamente meteorizadas con rellenos de arcillas blandas	
		CALIDAD DECRECIENTE →					
UNIÓN DECRECIENTE ENTRE BLOQUES DE ROCA ↓	 INTACTA O MASIVA - rocas intactas o masivas in situ, con pocas discontinuidades muy espaciadas	90	80	70	60	N/A	N/A
	 BLOCOSA - macizo rocoso bien unido e intacto, compuesto por bloques cúbicos formados por la intersección de tres sets de discontinuidades						
	 MUY BLOCOSA - masa unida y parcialmente perturbada con bloques angulares formados por 4 o más sets de discontinuidades						
	 BLOCOSA/PERTURBADA - plegada con bloques angulares formados por varios sets de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistosidad						
	 DESINTEGRADA - macizo rocoso pobremente unido y muy fracturado con bloques angulosos y redondeados						
	 LAMINADA/CIZALLADA - falta de blocosidad debido a pequeño espaciamiento de esquistosidad o planos de corte	N/A	N/A				10

Figura 1: Tabla general de GSI a partir de observaciones geológicas. Traducida de Marinos et al. (2007)

Por otro lado, Hoek et al. (2013) realiza una cuantificación del GSI, relacionándolo con el RQD y la condición de las discontinuidades del RMR de Bieniawski (1989) (Figura 2), donde el GSI quedará dado por:

$$GSI = 1,5 JCond_{89} + RQD/2$$

Ecuación 4

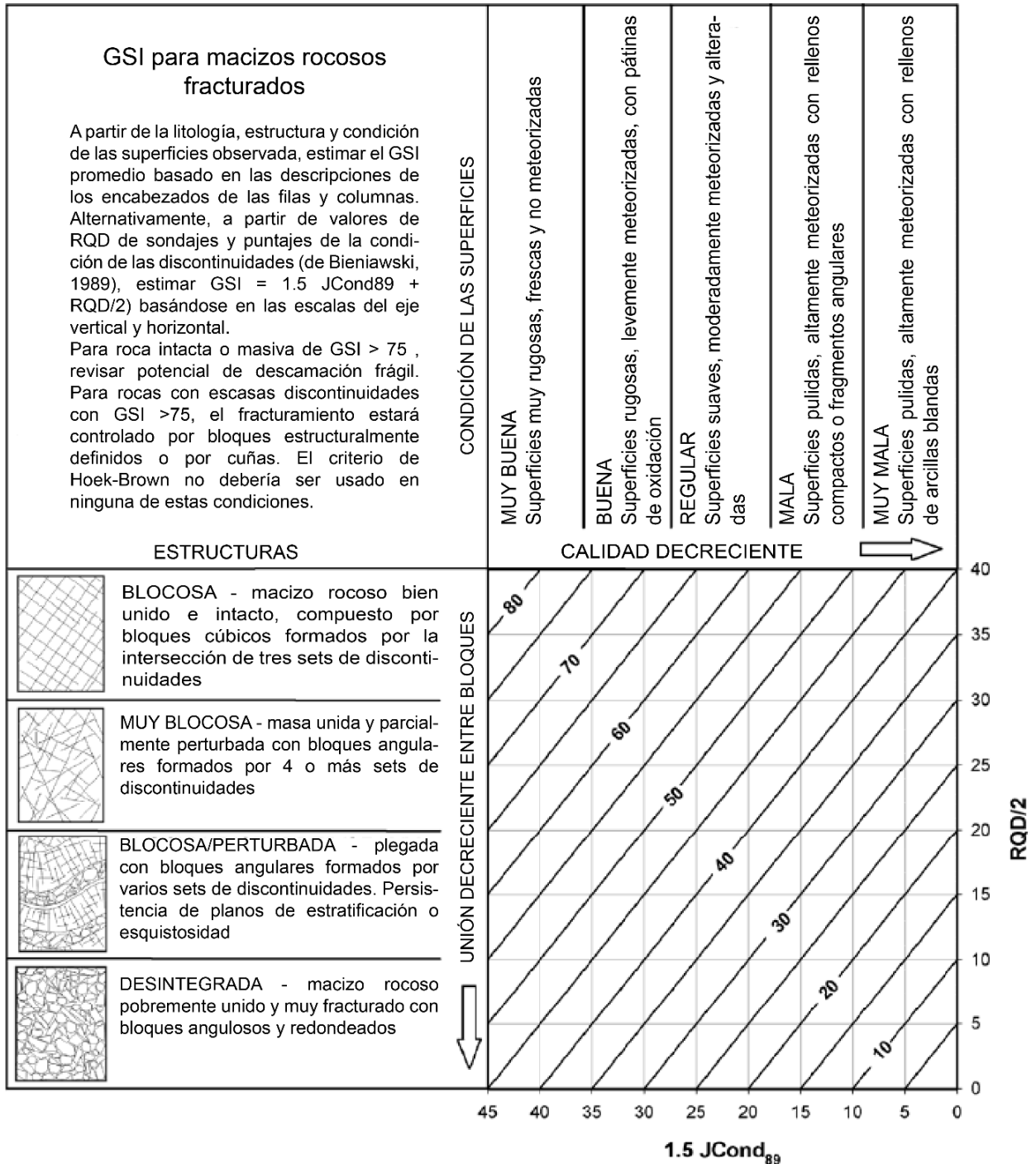


Figura 2: Cuantificación del GSI. Adaptado de (Hoek et al., 2013)

2.1.2.3 Q

El Q (Barton et al., 1974) es un valor numérico que corresponde a la calidad del macizo rocoso. Este indicador se obtiene a partir de seis parámetros:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

Ecuación 5

Donde:

- RQD: *Rock Quality Designation*
- J_n : número de sets de discontinuidades
- J_r : rugosidad de las discontinuidades
- J_a : grado de alteración o relleno en las discontinuidades
- J_w : factor de reducción por presencia de agua
- SRF: factor de reducción de stress

La primera fracción de la fórmula representa el tamaño de los bloques de roca, la segunda la resistencia al cizalle entre bloques y la tercera el estado de stress actual.

Para cada uno de los parámetros existen valores tabulados (Tabla 3 a Tabla 8). El valor de Q puede variar entre 0,001 y 1000, separando la calidad del macizo rocoso en distintos rangos:

- 0,001 – 0,01: roca excepcionalmente mala
- 0,01 – 0,1: roca extremadamente mala
- 0,1 – 1: roca muy mala
- 1 – 4: roca mala
- 4 – 10: roca regular
- 10 – 40: roca buena
- 40 – 100: roca muy buena
- 100 – 400: roca extremadamente buena
- 400 – 1000: roca excepcionalmente buena

Tabla 3: Descripciones y puntajes de RQD para el cálculo de Q. Adaptado de Barton et al. (1974)

1. RQD (Rock Quality Designation)		
A. Muy mala	0 - 25	Nota: (i) Si RQD ≤ 10 (incluyendo 0), se le asigna un valor de 10 para evaluar Q. (ii) Los intervalos de 5, es decir, 100, 95, 90, etc. son lo suficientemente acertados
B. Mala	25 - 50	
C. Regular	50 - 75	
D. Buena	75 - 90	
E. Excelente	90 - 100	

Tabla 4: Descripciones y puntajes de J_n para el cálculo de Q . Adaptado de Barton et al. (1974)

2. Cantidad de sets de discontinuidades (J_n)		
A. Masivo, sin diaclasar o con pocas discontinuidades	0,5 - 1	Nota: (i) Para intersecciones de túneles se utiliza ($2 \times J_n$) (ii) Para entradas y salidas de túneles se utiliza ($3 \times J_n$)
B. Un set	2	
C. Un set y algunas discontinuidades aleatorias	3	
D. Dos sets	4	
E. Dos sets y algunas discontinuidades aleatorias	6	
F. Tres sets	9	
G. Tres sets y algunas discontinuidades aleatorias	12	
H. Cuatro o más sets, discontinuidades aleatorias, muy diaclasado, etc	15	
J. Roca desintegrada	20	

Tabla 5: Descripciones y puntajes de J_r para el cálculo de Q . Adaptado de Barton et al. (1974)

3. Rugosidad de las discontinuidades (J_r)			
(a) Contacto entre las paredes de la discontinuidad			
(b) Contacto de las paredes de la discontinuidad antes de un cizalle de 10 cm			
A. Discontinuas	4	Nota: (i) Añadir 1,0 si el espaciamiento promedio de los sets relevantes es mayor a 3 m. (ii) $J_r = 0,5$ puede usarse para discontinuidades planas y pulidas qPara entradas y salidas de túneles se utiliza ($3 \times J_n$)	
B. Rugosas o irregulares, onduladas	3		
C. Suaves, onduladas	2		
D. Pulidas, onduladas	1,5		
E. Rugosas o irregulares, planas	1,5		
F. Suaves, planas	1		
G. Pulidas, planas	0,5		
(c) No hay contacto entre las paredes de la discontinuidad al ser cizallada			
H. Zona con arcillas de espesor suficiente para evitar el contacto de las paredes de la discontinuidad	1		
J. Zona arenosa, gravosa o desintegrada lo suficientemente gruesa para evitar el contacto entre las paredes de la discontinuidad	1		

Tabla 6: Descripciones y puntajes de Ja para el cálculo de Q. Adaptado de Barton et al. (1974)

4. Grado de alteración de las discontinuidades (Ja)			
(a) Contacto entre las paredes		ϕ_r	
A. Discontinuidad cerrada, relleno duro, que no se ablanda e impermeable (ej: cuarzo o epidota)	0,75	-	
B. Paredes sin alteración, solo manchas superficiales	1	25 - 30°	
C. Paredes levemente alteradas. Capas de minerales que no se ablandan, partículas arenosas, roca desintegrada sin arcillas, etc.	2	25 - 30°	
D. Capas limosas o arenosas, poca arcilla (que no se ablanda)	3	20 - 25°	
E. Capas de arcilla que se ablanda o de baja fricción (ej: caolinita, mica). También, clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. (Capas de 1 - 2 mm o menos de espesor)	4	8 - 16°	
(b) Contacto de las paredes antes de un cizalle de 10 cm		Nota: (i) Los valores de ϕ_r pretenden ser una guía aproximada de las propiedades mineralógicas de los productos de alteración, si están presentes.	
F. Partículas arenosas, roca desintegrada sin arcillas, etc.	4		25 - 30°
G. Rellenos de minerales arcillosos altamente sobreconsolidados y que no se ablandan (Continuas, < 5mm de espesor)	6		16 - 24°
H. Rellenos de minerales arcillosos que se ablandan, de media o baja sobreconsolidación (Continuas, < 5mm de espesor)	8		12 - 16°
J. Rellenos de arcillas expansivas, ej: montmorillonita (Continuas, < 5mm de espesor). El valor de Ja dependerá del porcentaje de arcillas expansivas y acceso al agua, etc	8 - 12		6 - 12°
(c) No hay contacto entre las paredes al ser cizallada			
K, L, M. Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H, J para la condición de las arcillas)	6, 8 u 8 - 12	6 - 24°	
N. Zonas o bandas de arcilla limosa o arenosa, pequeña porción de arcillas (que no se ablandan)	5	-	
O, P, R. Zonas o bandas gruesas de arcilla (ver G, H, J para la condición de las arcillas)	10, 13 o 13 - 20	6 - 24°	

Tabla 7: Descripciones y puntajes de J_w para el cálculo de Q . Adaptado de Barton et al. (1974)

5. Factor de reducción por presencia de agua (J_w)		Presión aprox.	
A. Excavaciones secas o con poco flujo (< 5 L/min localmente)	1	< 1 (kg/cm ²)	Nota: (i) Los factores C a F son estimaciones crudas. Incrementar J_w si se instalan medidas de drenaje. (ii) Problemas especiales causados por la formación de hielo no son considerados.
B. Afluencia media o presión ocasional con lavado de minerales de relleno	0,66	1 - 2,5 (kg/cm ²)	
C. Afluencia abundante o presión alta en roca competente con discontinuidades sin relleno	0,5	2,5 - 10 (kg/cm ²)	
D. Afluencia abundante o presión alta, lavado considerable de minerales de relleno	0,33	2,5 - 10 (kg/cm ²)	
E. Afluencia o presión de agua excepcionalmente alta en el momento de la voladura, que disminuye con el tiempo.	0,2 - 0,1	> 10 (kg/cm ²)	
F. Afluencia o presión de agua excepcionalmente alta continua sin disminución perceptible	0,1 - 0,05	> 10 (kg/cm ²)	

Tabla 8: Descripciones y puntajes de SRF para el cálculo de Q. Adaptado de Barton et al. (1974)

6. Factor de reducción de stress (SRF)		
(a) Zonas de debilidad intersectando excavaciones		Nota: (i) Reducir los valores de SRF en 25 – 50% si las zonas de cizalle importantes solo influyen pero no intersectan la excavación
A. Múltiples ocurrencias de zonas de debilidad que contienen arcillas o roca desintegrada químicamente, roca adyacente muy suelta (cualquier profundidad)	10	
B. Zonas de debilidad únicas que contienen arcillas o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación ≤ 50 m)	5	
C. Zonas de debilidad únicas que contienen arcillas o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación > 50 m)	2,5	
D. Múltiples zonas de cizalle en roca competente (libre de arcillas), roca ayacente suelta (cualquier profundidad)	7,5	
E. Zonas de cizalle simple en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación ≤ 50 m)	5	
F. Zonas de cizalle simple en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación > 50 m)	2,5	
G. Discontinuidades abiertas y sueltas, altamente diaclasado (cualquier profundidad)	5	
(b) Roca competente, problemas de stress de la roca		
H. Stress bajo, cercano a la superficie	2,5	
J. Stress medio	1	
K. Stress muy alto, estructura muy compacta (Usualmente favorable para estabilidad, podría ser desfavorable para estabilidad de talud)	0,5 - 2	
L. Estallido de roca suave	5 - 10	
M. Estallido de roca fuerte (roca masiva)	10 - 20	
(c) Roca deformable: flujo plástico o roca incompetente bajo la influencia de altas presiones		
N. Presión de deformación leve	5 - 10	
O. Presión de deformación fuerte	10 - 20	
(d) Roca expansiva: expansión química dependiendo de la presencia de agua		
P. Presión de expansión leve	5 - 10	
R. Presión de expansión fuerte	10 - 15	

2.1.3 Análisis cinemático

El análisis cinemático consiste en la identificación de las discontinuidades del macizo rocoso que tengan el potencial para generar deslizamientos. Se considera únicamente la geometría de la ladera y de las discontinuidades, sin considerar la influencia de fuerzas sísmicas ni cohesión de las estructuras (Lara, 2007).

2.1.3.1 Falla planar

Para que pueda ocurrir un deslizamiento plano o falla planar se deben cumplir las siguientes condiciones geométricas (Hoek & Bray, 1981):

- El plano en el cual se produzca el deslizamiento debe tener rumbo paralelo o similar al plano de la ladera, en un rango de $\pm 20^\circ$. Lo mismo ocurre con la dirección de manto (*Dip Direction*), es decir, ambas estructuras deben mantear en la misma dirección.
- El manto del plano de falla (Ψ_p) debe ser menor al manto de la ladera (Ψ_f), es decir $\Psi_p < \Psi_f$.
- El manto del plano de falla (Ψ_p) debe ser mayor al ángulo de fricción interna de la superficie (ϕ), es decir, $\Psi_p > \phi$.

En la Figura 3 se muestran las condiciones geométricas bajo las que podría producirse falla planar.

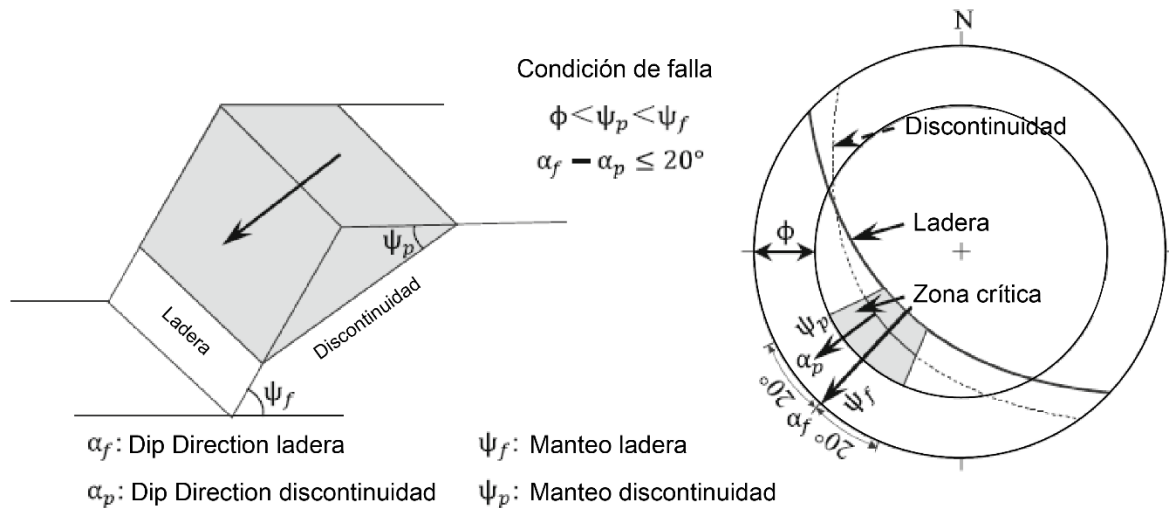


Figura 3: Condiciones geométricas para que pueda ocurrir falla planar. Adaptado de Zhou et al. (2017)

2.1.3.2 Falla en cuña

Para que se pueda producir una falla en cuña se deben cumplir las siguientes condiciones (Zhou et al., 2017):

- Deben existir dos planos que formen una intersección. El *trend* de la línea de intersección (α_i) debe ser similar a la dirección de manto (*Dip Direction*) de la ladera/talud (α_f).
- La línea de intersección debe aflorar en la ladera, es decir, el *plunge* de la línea de intersección (ψ_i) debe ser menor al manto de la ladera (ψ_f).
- El *plunge* de la línea de intersección (ψ_i) debe ser mayor al ángulo de fricción interna de la superficie (ϕ). Si los ángulos de fricción de las superficies que generan cuña son muy distintos, se puede considerar el promedio.

En la Figura 4 se representan las condiciones geométricas bajo las que podría haber falla en cuña.

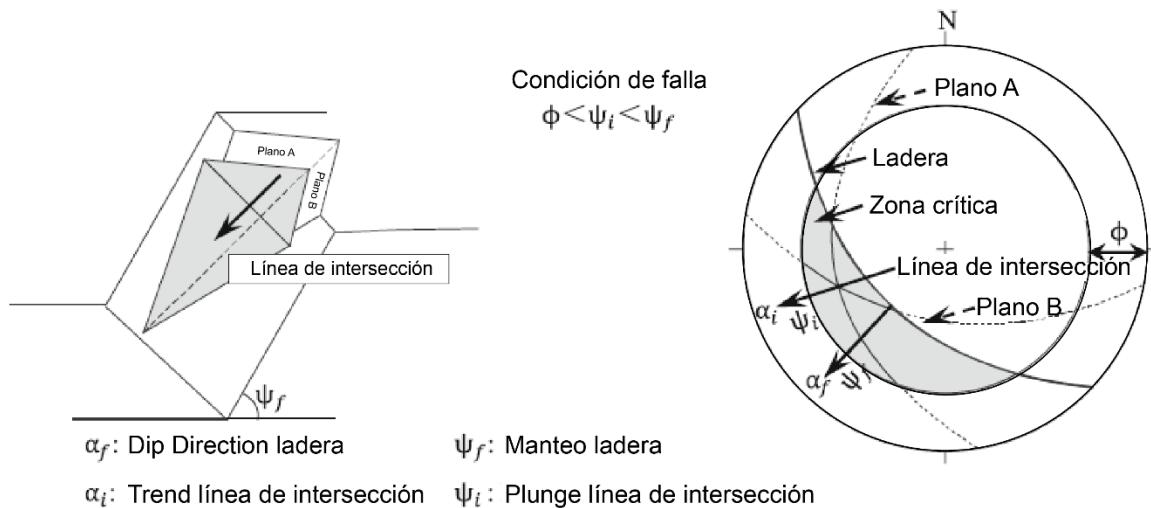


Figura 4: Condiciones geométricas para que se produzca falla en cuña. Adaptada de Zhou et al. (2017)

2.1.3.3 Volcamiento (Toppling)

Para que pueda ocurrir volcamiento o *toppling* deben cumplirse las siguientes condiciones (Lara, 2007; Zhou et al., 2017):

- El rumbo de las discontinuidades con potencia de generar volcamiento debe ser paralelo o similar al de la ladera, en un rango de $\pm 20^\circ$.

- El manto de las discontinuidades (Ψ_p) debe ser en dirección opuesta a la dirección de manto de la ladera (Ψ_f).
- La recta perpendicular al plano con potencial de generar *toppling* ($90^\circ - \Psi_p$) debe tener un buzamiento sumada al ángulo de fricción interna, debe ser menor al manto de la ladera, es decir:

$$(90^\circ - \Psi_p + \phi) < \Psi_f$$

En la Figura 5 se muestran las condiciones geométricas bajo las cuales podría producirse *toppling*.

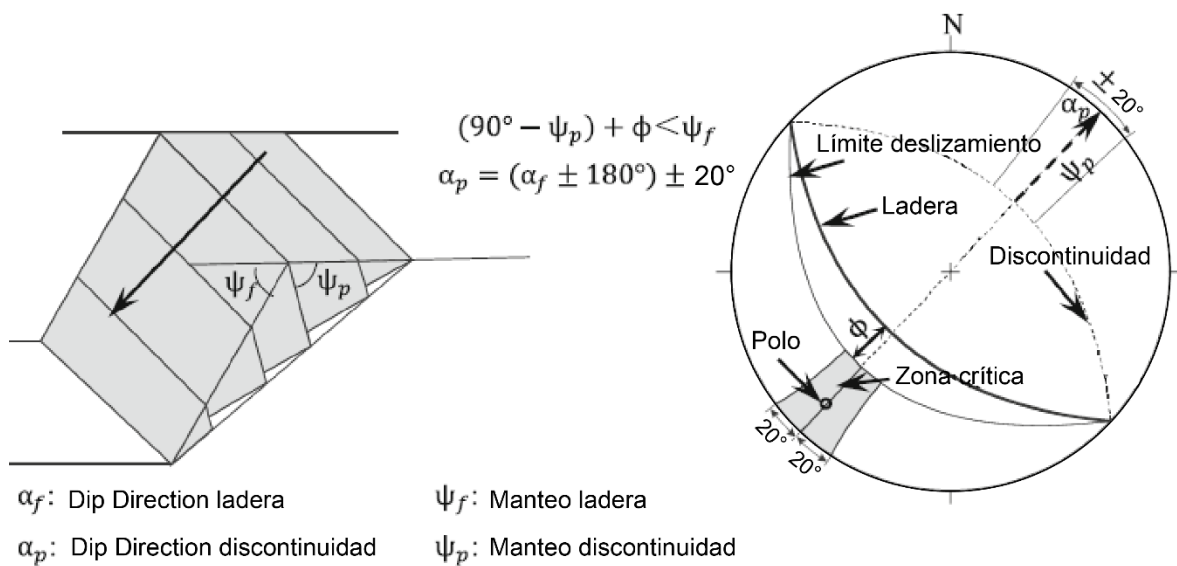


Figura 5: Condiciones geométricas para que pueda producirse *toppling*. Modificada de Zhou et al. (2017)

2.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA FOTOGRAMETRÍA

La palabra “fotogrametría” viene del griego *photon* (luz), *graphos* (escrito) y *metrom* (mediciones), y significa “mediciones realizadas a través de fotografías”. De forma general, la fotogrametría corresponde a la ciencia y tecnología de obtener información confiable a través de imágenes adquiridas por sensores (Coelho & Brito, 2007).

Los inicios de esta metodología se remontan a 1840, donde se intentó utilizar para realizar levantamientos topográficos. Sin embargo, recién en 1851, Aimé Laussedat desarrolló los primeros principios y técnicas fotogramétricas. Posteriormente, en 1889 C. Koppe publicó el primer libro sobre la metodología (Coelho & Brito, 2007).

Durante la primera mitad del siglo XX, se desarrolló la fotogrametría analógica, donde la invención del estereocomparador facilitó el mapeo de superficies extensas y generación de cartas topográficas, evitando cálculos numéricos tediosos. Además, fueron surgiendo cámaras cada vez más avanzadas que permitían la obtención de información relevante respecto al sistema de coordenadas de las imágenes, aumentando la precisión de las mediciones (Coelho & Brito, 2007).

La invención del computador en los años 40 permitió la realización de extensos cálculos numéricos de forma automatizada y comenzó a implementarse la fotogrametría analítica. El primer estudio computarizado fue realizado en 1953 por el Dr. Helmut Schmidt, en Maryland, Estados Unidos, donde se establecieron las bases de la fotogrametría analítica, incluyendo métodos estadísticos, solución simultánea de múltiples fotografías y análisis de propagación de errores (Coelho & Brito, 2007).

Finalmente, durante los años 80 surgió la fotogrametría digital, que se utiliza hasta hoy en día. Esta técnica tiene como principal innovación el uso de imágenes digitales como fuente primaria de datos, las cuales pueden ser obtenidas directamente de una cámara digital. Su objetivo principal es reconstruir un espacio tridimensional de forma automática a partir de imágenes bidimensionales (Coelho & Brito, 2007).

2.2.1 Usos de la fotogrametría digital

Existen diversos trabajos en los que se ha utilizado la fotogrametría digital para el análisis de estabilidad de taludes o para la clasificación de macizos rocosos.

Sant’Anna (2020) realizó una recopilación histórica de trabajos que la han utilizado para fines geotécnicos, destacando que esta metodología permite principalmente la obtención de la orientación de las discontinuidades, pero también puede utilizarse para determinar el espaciamiento y persistencia de las estructuras. Sin embargo, se recalca que para los análisis geotécnicos de macizo rocoso existentes, la fotogrametría ha servido de *complemento* para los datos obtenidos de forma tradicional y no como una técnica de clasificación por sí sola.

Además, la fotogrametría digital ha sido utilizada en geología estructural para la generación de modelos tridimensionales que permiten entender la cinemática de deformación en zonas complejamente deformadas, a través de la representación tridimensional de afloramientos y muestras de mano (Zúñiga, 2016).

2.2.1.1 *Structure from Motion*

Structure from Motion (SfM) es una técnica de fotogrametría digital basada en imágenes que permite obtener nubes de puntos tridimensionales de alta resolución. Su principal ventaja es que requiere poca capacitación y es de bajo costo (Fonstad et al., 2013).

A diferencia de la fotogrametría tradicional, donde las imágenes son capturadas en líneas de vuelo paralelas, *SfM* fue diseñado para restituir la geometría tridimensional de objetos a partir de imágenes adquiridas aleatoriamente, con el único requisito de que el mismo punto aparezca en múltiples imágenes (Fonstad et al., 2013).

2.3 PROGRAMAS DE PROCESAMIENTO DE NUBES DE PUNTOS 3D

Actualmente, existen distintos programas computacionales, de libre acceso o pagados, que utilizan la técnica fotogramétrica *Structure from Motion* para la obtención de nubes de puntos 3D, por ejemplo, *Agisoft Metashape*, *PIX4Dmapper*, *RealityCapture* y *3DF Zephyr*.

En este trabajo se utilizó el software *Agisoft Metashape* para la construcción de la nube de puntos y los softwares *CloudCompare* y *Discontinuity Set Extractor* para el análisis geotécnico y estructural del afloramiento estudiado.

2.3.1 **Agisoft Metashape**

Agisoft Metashape es un producto de software autónomo que permite el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales, generando datos espaciales tridimensionales para su uso en aplicaciones SIG, documentación patrimonial y producción de efectos visuales, así como para medir objetos indirectamente en diferentes escalas (Agisoft LLC, 2023).

Este programa utiliza la técnica *Structure from Motion* para obtener una nube de puntos 3D y permite el procesamiento de imágenes tomadas con cámaras métricas y no-métricas, por lo que no se requiere equipamiento fotogramétrico especial. Respecto a la resolución, no hay limitantes, pero es recomendable trabajar con imágenes de una calidad mínima de 5Mpx (Agisoft LLC, 2023).

Para la metodología de clasificación de macizo rocoso elaborada en este trabajo se recomienda trabajar con equipos profesionales, específicamente drones con antena RTK (*Real Time Kinematics*), asegurando una georreferenciación de las imágenes de alta

precisión, permitiendo la correcta medición de las distancias relevantes para la clasificación de macizo rocoso.

Respecto a la toma de imágenes, los requerimientos dependerán del método de captura. Por ejemplo, para fotografías aéreas las imágenes se recomienda un solapamiento lateral del 60% y frontal del 80%, pero dependerán de la geometría del objeto a estudiar, pues mientras más irregular sea la estructura, será mejor tener mayores solapamientos. Además, las fotografías deben tomarse en condiciones de luminosidad y momentos del día similares, pues fotos de un mismo lugar con distinta iluminación pueden llevar a errores de procesamiento (Agisoft LLC, 2023). Mayores especificaciones pueden ser encontradas en el manual de uso del programa.

El procedimiento para la construcción de la nube de puntos 3D con *Agisoft Metashape* a partir de imágenes georreferenciadas se detalla a continuación, siguiendo el manual de uso (Agisoft LLC, 2023):

En primer lugar, se deben cargar las imágenes desde el menú “Flujo de trabajo” donde se pueden añadir fotos o añadir carpetas de fotos (Figura 6). Para eliminar imágenes no deseadas, se deben seleccionar en el panel “Espacio de trabajo” ubicado en el costado izquierdo de la interfaz, y apretando click derecho aparecerá la opción de eliminarlas (Figura 7).

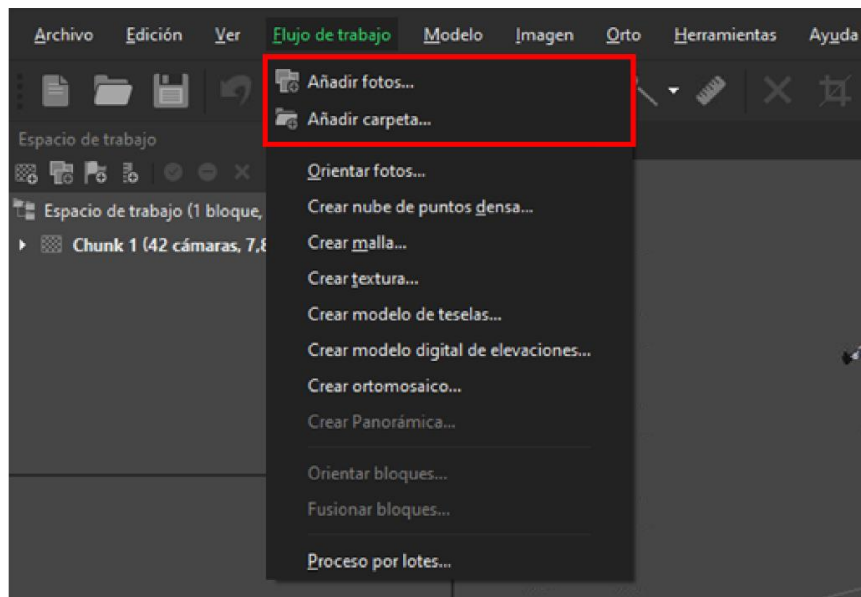


Figura 6: Captura de la interfaz de Agisoft Metashape donde se cargan las fotos al programa

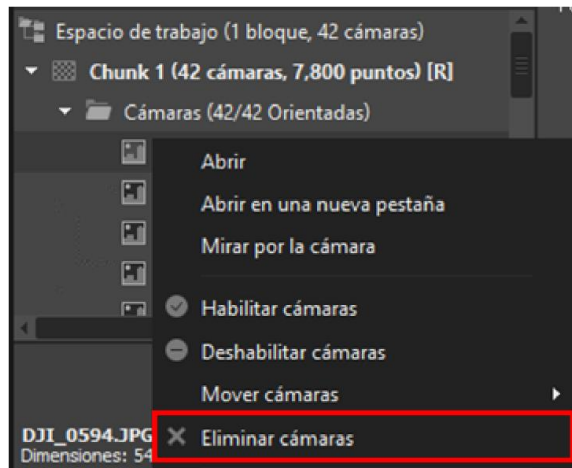


Figura 7: Captura de la interfaz de Agisoft Metashape donde se eliminan imágenes

Una vez filtradas las imágenes, se deben orientar con la herramienta “Orientar fotos” del menú “Flujo de trabajo” (Figura 8). Se recomienda trabajar con una precisión alta y mantener los otros parámetros que vienen por defecto.

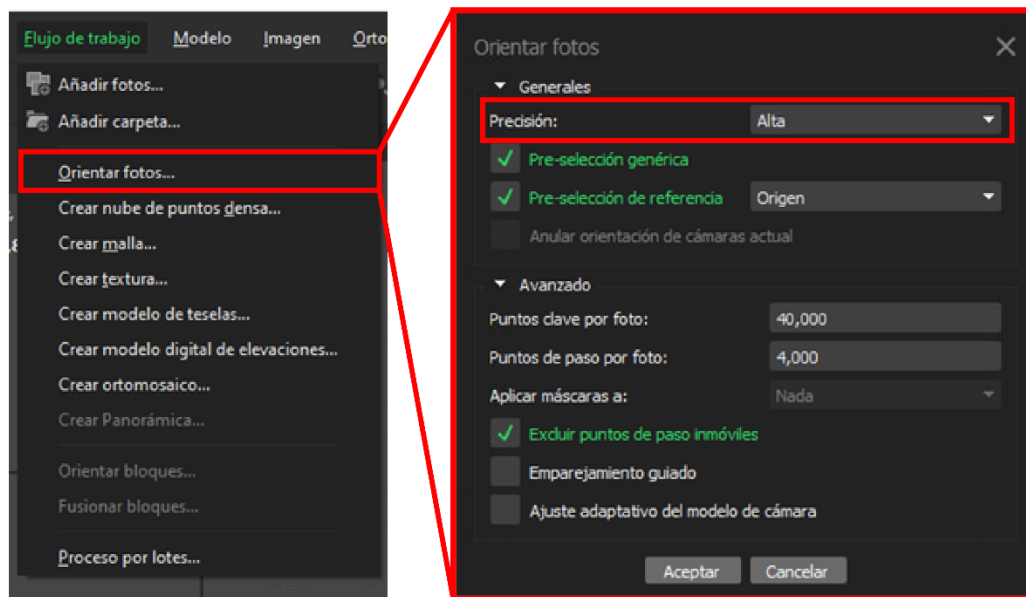


Figura 8: Captura de la interfaz de Agisoft Metashape donde se orientan las fotos y los parámetros asociados

Finalmente, se puede construir la nube de puntos densa seleccionando el comando “Crear nube de puntos densa” del menú “Flujo de trabajo” (Figura 9). Se recomienda utilizar una calidad alta y el resto de los parámetros se pueden modificar a gusto del usuario o dejarlos como vienen por defecto. También se puede utilizar una calidad ultra alta, pero la nube de puntos será más pesada, ralentizando (o impidiendo) su procesamiento en otros softwares, dependiendo del equipo utilizado.

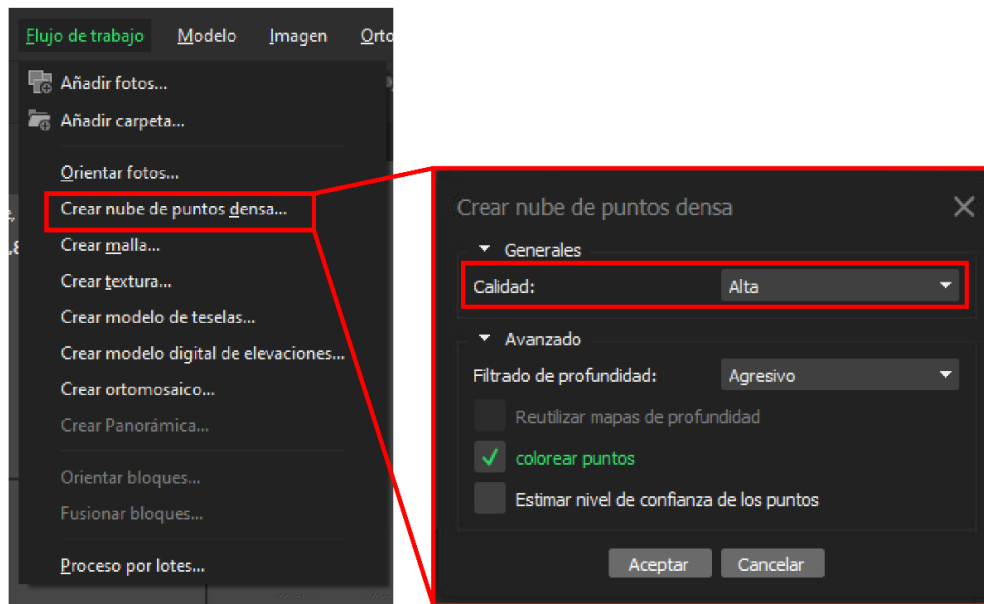


Figura 9: Captura de la interfaz de Agisoft Metashape donde se crea la nube de puntos densa y los parámetros asociados

2.3.2 CloudCompare

CloudCompare es un software de código libre que permite el procesamiento de nubes de puntos 3D y mallas triangulares. Incluye una variedad de algoritmos avanzados como remuestreo, manejo de campos de color/normales/escalares, cálculo estadístico, segmentación interactiva o automática, entre otros (Girardeau-Montaut, 2012).

Este programa permite editar la nube de puntos 3D utilizada para la fotogrametría, pudiendo recortarla o filtrarla. También, se pueden hacer mediciones estructurales para determinar orientaciones de planos dentro de la nube de puntos, junto con medir distancias entre dos puntos, de forma manual (Figura 10).

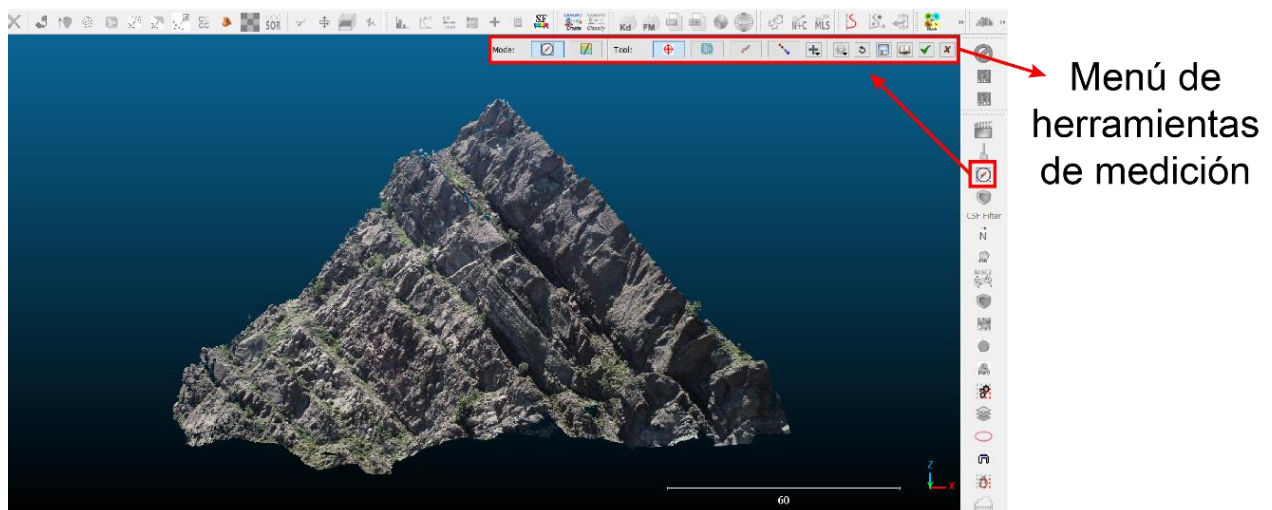


Figura 10: Captura de la interfaz de CloudCompare donde se encuentran las herramientas de medición

Por último, este software es bastante útil para la visualización de nubes de puntos, pudiendo observarlas desde distintos ángulos y a distintas escalas.

2.3.3 Discontinuity Set Extractor (DSE)

Discontinuity Set Extractor es un software de código abierto programado en MATLAB que sirve para aplicar el método de identificación y extracción de familias de discontinuidades planas a partir de nubes de puntos 3D. Fue desarrollado durante la tesis doctoral de Adrián Riquelme en la Universidad de Alicante en el año 2015 (Riquelme, 2023a).

Una vez cargada la nube de puntos, DSE permite identificar los diferentes sets de discontinuidades en afloramientos rocosos de forma automática a partir del cálculo de los vectores normales de cada punto. El método utilizado se basa en la premisa de que los planos se definen por puntos rodeados de otros puntos con normales de orientaciones similares dentro de ciertos rangos. Cabe destacar que las discontinuidades en los macizos rocosos pueden presentar irregularidades asociadas a la rugosidad y ondulación, por ende, la orientación de las normales es similar, pero no idéntica (Riquelme, 2023c).

El usuario debe definir el “knn” que corresponde a la cantidad de puntos vecinos más cercanos con los que se comparará cada uno de los puntos. El valor típico suele ser 30, pero puede ajustarse según las características de la nube de puntos, teniendo en cuenta que mientras mayor sea el número de vecinos, los detalles e irregularidades de las superficies perderán importancia. En caso de que se quiera realizar una prueba de coplanaridad, se debe definir una tolerancia, siendo 0,2 un valor razonable para descartar puntos que no son verdaderamente coplanares (Riquelme, 2023c). Para calcular los vectores normales basta con presionar el recuadro encerrado en rojo en la Figura 11.

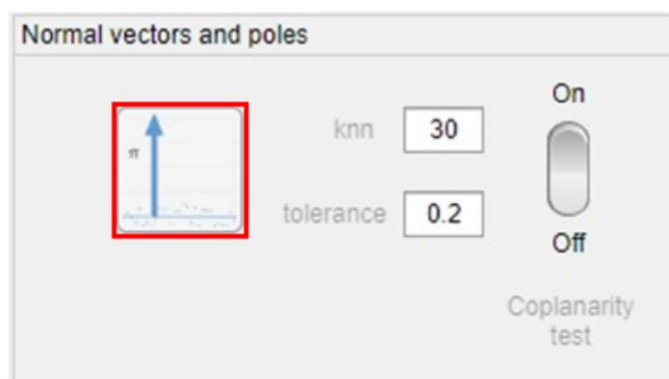


Figura 11: Captura de la interfaz de DSE donde se calculan los vectores normales

Luego de calcular las normales, el programa permite calcular la densidad de polos, obteniendo los polos principales asociados a cada familia de discontinuidades, presionando en el ícono encerrado en rojo en la Figura 12. El usuario puede definir los parámetros asociados al tamaño de matriz (bins level), el ángulo máximo entre vectores

normales de los polos principales (Min angle) y el número máximo de polos principales (Nmax DS). Los más importantes serán los dos últimos, donde se recomienda utilizar un ángulo máximo de 30° pudiendo reducirse a 20° cuando existan sets de orientación similar, y 10 polos principales pudiendo descartar resultados que se interpreten como no válidos (Riquelme, 2023d).

Una vez calculados los polos principales, aparecerá el Dip y DipDirection de cada uno de los sets de discontinuidades, que podrán ser filtrados, eliminando los que no correspondan realmente a familias de discontinuidades. Esta edición se realiza en el menú que se despliega al seleccionar el ícono encerrado en verde en la Figura 12.

Las orientaciones de los sets de discontinuidades obtenidos podrán servir para realizar análisis cinemáticos de los distintos modos de falla.

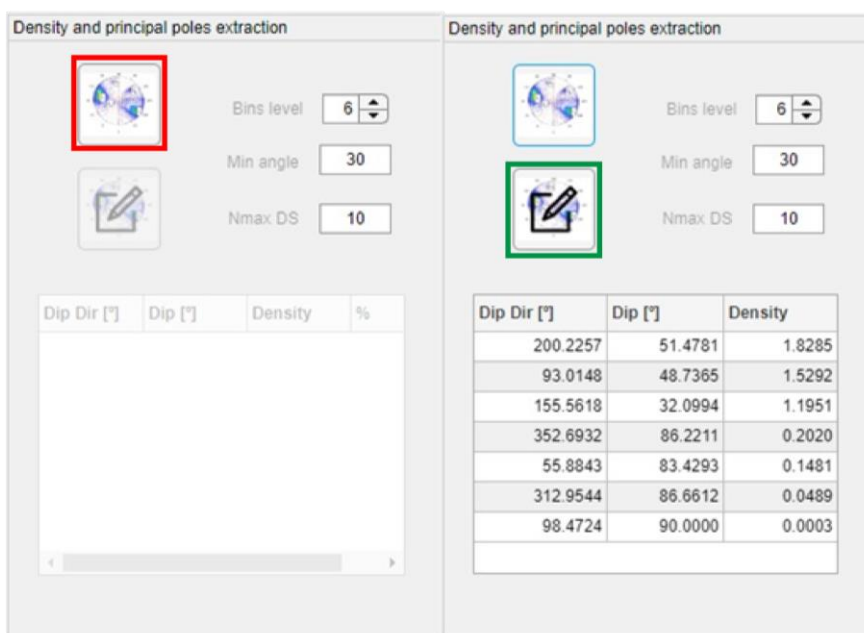


Figura 12: Captura de la interfaz de DSE donde se calculan los polos principales y sus orientaciones calculadas

Posteriormente, los puntos de la nube pueden ser clasificados según la familia a la que pertenezcan utilizando la herramienta “assign a DS to each point”, la cual asigna un set de discontinuidades (DS) a cada punto, seleccionando el ícono encerrado en rojo en la Figura 13. Esto se realiza utilizando un criterio geométrico donde se identifica el polo del vector normal de cada punto, luego se busca el polo principal más cercano y si el ángulo entre el vector normal del punto y el de la familia es menor o igual al valor límite definido por el usuario (Cone), se asigna a esta familia, de lo contrario no se realiza la asignación (Riquelme, 2023b). Respecto al límite para la asignación, el autor del software recomienda utilizar 30°.



Figura 13: Captura de la interfaz de DSE donde se clasifican los puntos de la nube de puntos 3D

De esta forma, se puede graficar la nube de puntos categorizada por sets de discontinuidades, presionando el ícono encerrado en la Figura 14. Cada color representa un set de discontinuidades.

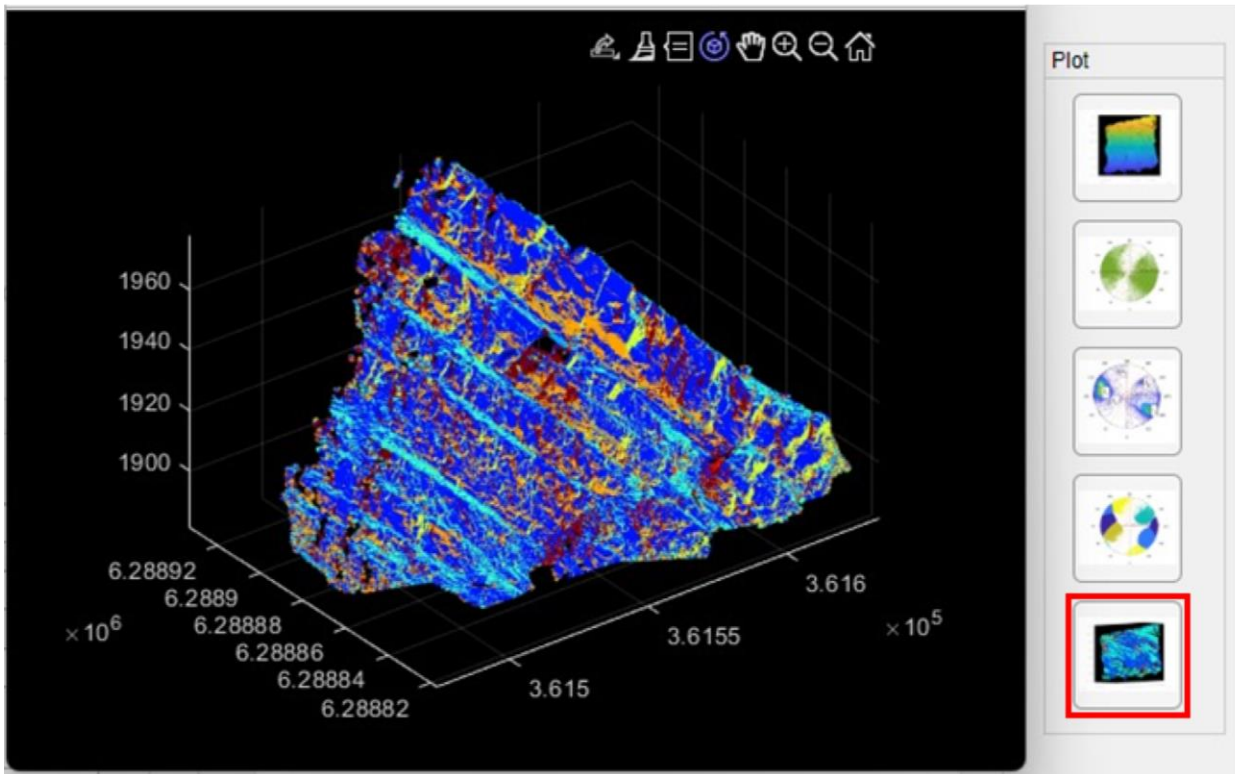


Figura 14: Captura de la interfaz de DSE de la gráfica de la nube de puntos categorizada por sets de discontinuidades

Esta nube será la que servirá de ayuda para la visualización de los sets de discontinuidades y para la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital.

3 CONSTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA CLASIFICACIÓN REMOTA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

La metodología propuesta en este estudio para la clasificación geotécnica de macizo rocoso utilizando la técnica *Structure from Motion* consta de cuatro etapas principales y comprende la utilización de los sistemas de clasificación RMR y GSI.

Se debe destacar que esta metodología tiene un enfoque principalmente cualitativo y sirve para el estudio de cualquier macizo rocoso, ya sean afloramientos naturales o macizos asociados obras de ingeniería como taludes o túneles. En la Figura 15 se presenta un diagrama simplificado de la metodología para la clasificación geotécnica de macizo rocoso mediante fotogrametría digital.

Es importante destacar que se analizaron los sistemas de clasificación RMR, GSI y Q, y se identificaron ciertas limitaciones para la utilización de fotogrametría en cada sistema de clasificación. Con este análisis se decidió trabajar solo con RMR y GSI, descartando Q. Mayores detalles se exponen en el apartado 3.1.

La metodología fue diseñada para clasificar el macizo rocoso según el RMR de Bieniawski (1989) y el GSI de Marinos & Hoek (2000), o en su defecto, la escala de GSI cuantificada según el RQD y la condición de las discontinuidades de Hoek et al. (2013).

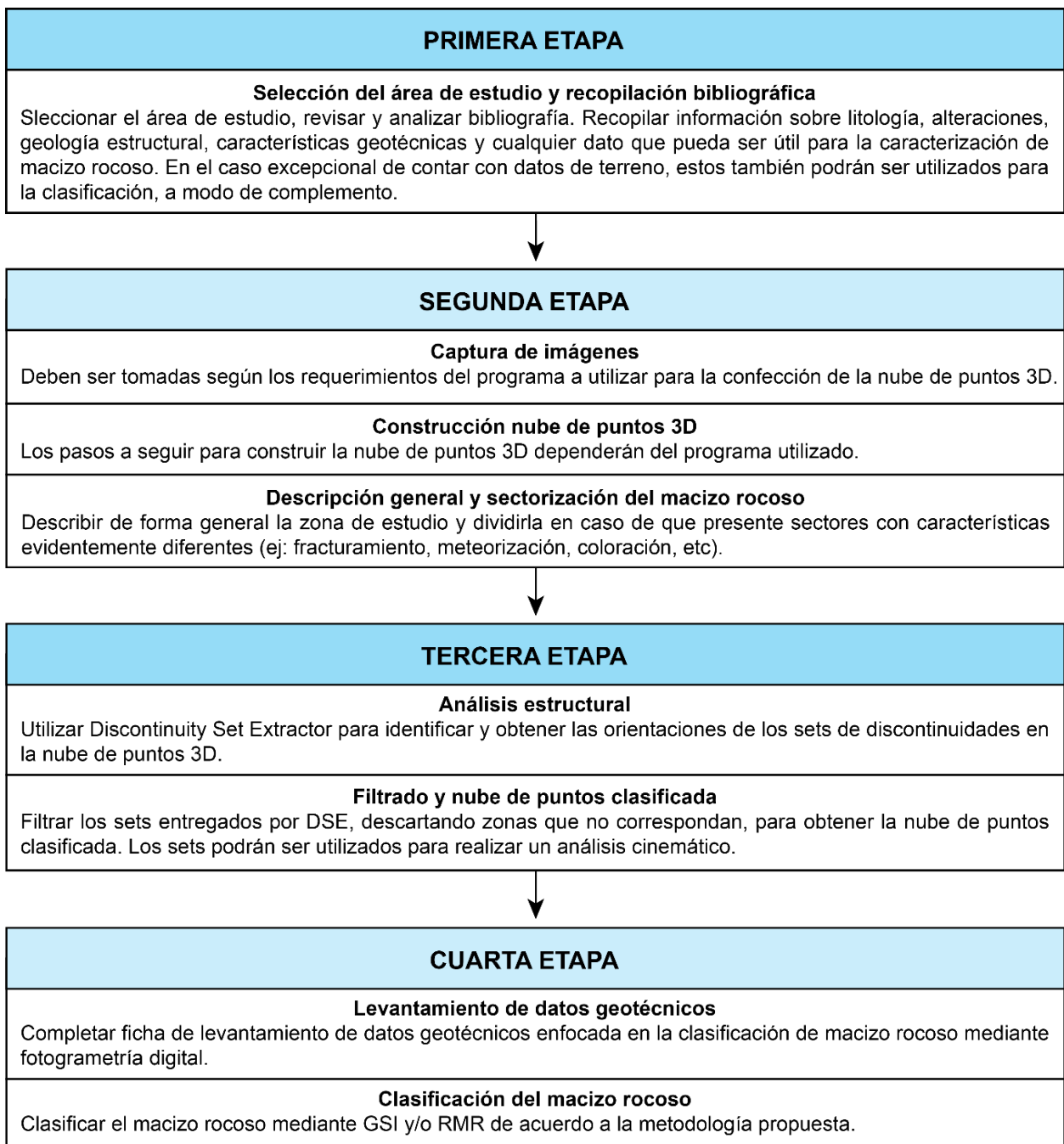


Figura 15: Diagrama simplificado de las etapas de la metodología

3.1 LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN

A continuación, se detallan las principales limitaciones encontradas para utilizar exclusivamente fotogrametría en la determinación de las clasificaciones de macizo rocoso según RMR, GSI y Q.

3.1.1 Limitaciones del RMR

Respecto al RMR, hay que considerar que el RQD requiere de un alto nivel de detalle por la forma en la que está definido. Coelho (2019) calculó el RQD *in situ* y con fotogrametría, obteniendo valores de RQD 7 a 8% mayores a los obtenidos en terreno, debido a la pérdida de exactitud de las mediciones del espaciamiento medio en *CloudCompare*, especialmente en zonas altamente fracturadas donde los espaciamientos entre discontinuidades son muy pequeños. A pesar de que la variación no es tan grande en ese caso de estudio, es probable que los cálculos del RQD de forma remota sean poco confiables en casos de estudio de mayor escala.

Teniendo esto en cuenta, se propone estimar el RQD a través de su relación con el GSI propuesta por Hoek et al. (2013), en casos donde no pueda ser calculado directamente.

Por otro lado, hay parámetros asociados a la condición de las discontinuidades que no podrán ser determinados debido a que la resolución máxima que podrían alcanzar las imágenes de dron. Específicamente, *la apertura y el relleno de las discontinuidades* toman valores de escala milimétrica (nula o de <0,1 a >5mm en el caso de la apertura, y sin relleno o espesores de <5 mm o >5 mm en el caso del relleno), los cuales no serán posibles de identificar mediante la fotogrametría debido a la máxima resolución alcanzable por las imágenes. Además, el tipo de relleno no podría identificarse solo con fotogrametría, pues no se podrá conocer su dureza.

Por su parte, la rugosidad solo ha sido obtenida con imágenes que permitan una resolución milimétrica de la nube de puntos. Salvini et al. (2020) fueron capaces de estimar la rugosidad analizando perfiles de diferentes longitudes en planos de discontinuidades, comparándolos con resultados obtenidos en terreno y mediante escaneo láser terrestre (TLS), concluyendo que las nubes de puntos 3D derivadas del procesamiento de imágenes capturadas con drones, sirven para la representación confiable de la rugosidad de discontinuidades para perfiles de 60 cm de largo. De esta forma, la rugosidad podría ser estimada a partir de nubes de puntos, pero solo en casos de calidad extremadamente alta, es decir, resolución milimétrica.

Para la mayoría de los casos, es probable que no se cuente con estos requisitos, por ende, se propone una estimación del RMR dentro de un rango de variación (ΔRMR), a partir del cálculo de un $RMR_{m\acute{a}ximo}$, y un $RMR_{m\acute{i}nimo}$, quedando expresado como:

$$RMR_{intermedio} = \frac{RMR_{m\acute{a}ximo} + RMR_{m\acute{i}nimo}}{2}$$

Ecuación 6

$$\Delta RMR = \frac{RMR_{m\acute{a}ximo} - RMR_{m\acute{i}nimo}}{2}$$

Ecuación 7

$$RMR = RMR_{intermedio} \pm \Delta RMR$$

Ecuación 8

En el caso más general, el $RMR_{m\acute{a}ximo}$ se obtiene con los valores máximos que podrían aportar la apertura, la rugosidad y el relleno (18 puntos en total), y el $RMR_{m\acute{i}nimo}$, se obtiene en el peor de los casos, donde estos parámetros aportan 0 puntos a la clasificación. De esta forma, el RMR obtenido con fotogrametría quedaría dado por:

$$RMR = RMR_{intermedio} \pm 9$$

Ecuación 9

El rango de variación del RMR (ΔRMR) puede disminuir descartando algunas opciones en cada una de las características mencionadas según la disponibilidad de información bibliográfica. Esto dependerá netamente del caso específico de estudio y queda a criterio de la/el profesional a cargo.

3.1.2 Limitaciones del GSI

La principal limitación del GSI será la determinación de la rugosidad de las superficies. Al igual que para el RMR, esta no podrá determinarse a no ser que se esté trabajando a una escala extremadamente detallada.

Para evitar confusiones o errores de clasificación, se recomienda hacer un estimado simplificado de la condición de las superficies y de las estructuras en intervalos. Se propone utilizar rangos que abarquen por completo cada categoría de la condición de las discontinuidades y de las estructuras, tal como se muestra en la Figura 16.

Cabe destacar que el GSI también puede ser estimado entre dos categorías (de la condición de las superficies o de las estructuras) respetando los intervalos de variación mencionados anteriormente. Esto se sugiere con el propósito de estandarizar la forma de obtener el GSI con la metodología desarrollada en este trabajo, pero queda a criterio del personal a cargo del estudio.

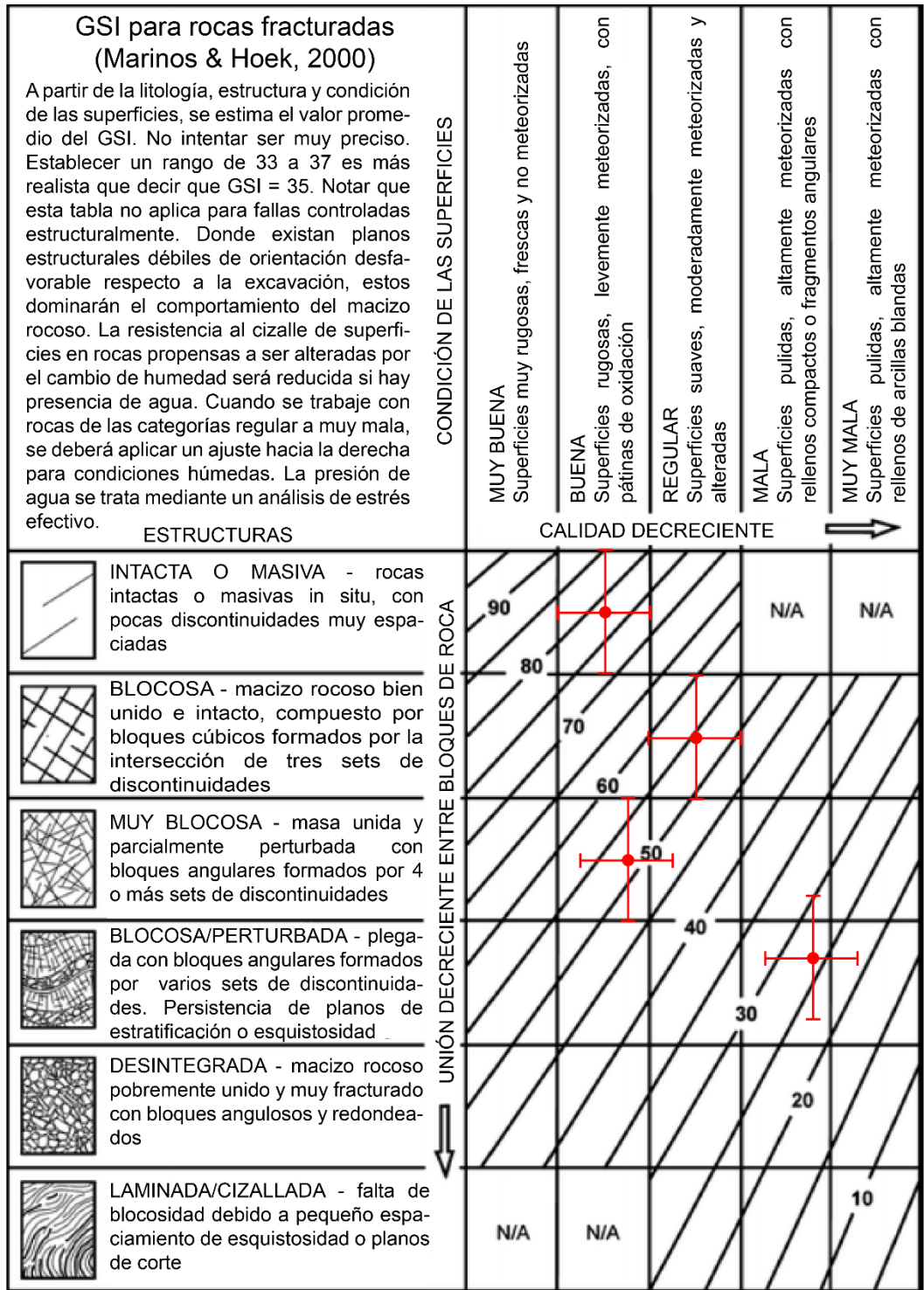


Figura 16: Ejemplos de GSI determinados en intervalos. Las cruces representan ejemplos de los rangos sugeridos en este trabajo.

3.1.3 Limitaciones del Q

El sistema de clasificación Q requiere de un mayor nivel de detalle, especialmente para la obtención de Ja y Jr. Además, también considera el RQD, el cual puede ser difícil de obtener mediante fotogrametría, como se menciona anteriormente.

Particularmente, el Jr puede variar entre 0,5 y 4, mientras que el Ja puede variar entre 0,75 y 20. En el peor de los casos, el cociente entre ambos parámetros será 0,025 y en el mejor de los casos será $\sim 5,3$. Esto representa una variabilidad extremadamente alta, donde el peor de los casos será unas 213 veces más bajo que el mejor de los casos.

No se recomienda utilizar este sistema de clasificación exclusivamente con fotogrametría, debido a la gran cantidad de suposiciones que deben realizarse. El uso indebido de esta clasificación podría llevar a errores fatales si se utiliza para la determinación de las medidas de contención para obras como túneles o taludes.

3.2 PRIMERA ETAPA

En primer lugar, se debe seleccionar el área de estudio. Una vez seleccionada, es fundamental el estudio bibliográfico y la revisión de cartas geológicas donde se ubique la zona de estudio. La recopilación de antecedentes será crucial para la estimación de ciertos factores o parámetros de cada sistema de clasificación de macizo rocoso.

Principalmente, se deben recopilar datos asociados a litología, alteraciones, geología estructural y características geotécnicas. En el caso excepcional de contar con datos de terreno, estos también podrán ser utilizados para la clasificación representando un complemento, pues el propósito de esta metodología es centrarse en el uso de datos obtenidos de forma remota.

3.3 SEGUNDA ETAPA

Una segunda etapa comprende la toma de fotografías y la confección de la nube de puntos 3D con cualquier software que sirva para este propósito. En este caso se trabajó con *Agisoft Metashape*, pero existen otros programas que cumplen la misma función. Para *Agisoft Metashape* las imágenes pueden ser tomadas con cámaras métricas o no-métricas (Agisoft LLC, 2023), y la resolución dependerá del resultado deseado.

Los pasos a seguir para la construcción de la nube de puntos dependerán del programa utilizado. Una vez construida la nube de puntos (nube A, de aquí en adelante), esta puede ser filtrada o recortada a gusto del usuario utilizando *CloudCompare*, para descartar zonas que obstaculicen el análisis de la nube, por ejemplo, áreas con vacíos de puntos o con vegetación. Este filtrado también sirve para reducir el tamaño de la nube y que los programas puedan procesarla de mejor manera.

Además, se debe realizar una descripción geológica general de la zona de estudio, la cual puede ser dividida en distintos sectores en caso de que su aspecto sea notablemente diferente, es decir, que se observen zonas con distinto grado de diaclasamiento o meteorización, diferentes litologías o coloración, cambios en la orientación de las fracturas, etc. Esto quedará a criterio de la/el profesional a cargo del estudio.

3.4 TERCERA ETAPA

La tercera etapa consiste en el análisis estructural de la nube de puntos 3D con el software *Discontinuity Set Extractor* (DSE), para la obtención de las familias (sets) de discontinuidades. Los pasos a seguir se encuentran en el apartado 2.3.3. Los resultados entregados por este programa han sido ampliamente contrastados con datos medidos *in situ* con métodos convencionales, obteniendo diferencias de $\sim 5^\circ$, lo cual es totalmente aceptable en análisis de macizos rocosos (Tomás et al., 2020).

Esta etapa es fundamental para la aplicación de los sistemas de clasificación y requiere de criterio experto para el filtrado de los sets de discontinuidades entregados por el programa, ya que se analizará la nube de puntos por completo, detectando zonas que no corresponden a fracturas o diaclasas dentro de sets de discontinuidades, por ejemplo, sectores con vegetación, acumulación de suelo, entre otros. Es importante comparar la nube de puntos categorizada por DSE (preliminar) con la nube A para determinar cuáles sets de discontinuidades entregados por el software deben ser descartados.

Una vez identificados los sets de discontinuidades, se tendrá la nube de puntos 3D categorizada por familia de discontinuidades (nube B, de aquí en adelante), y se procederá a estimar e identificar los parámetros de cada sistema de clasificación que se quiera utilizar en la siguiente etapa de la metodología.

Cabe destacar que una baja resolución de la nube de puntos dificultará la identificación de los sets de discontinuidades con DSE, pudiendo dejar diaclasas de menor tamaño sin clasificar dentro de los sets de discontinuidades. Esto no quiere decir que las fracturas no pertenezcan a alguna de las familias identificadas, por ende, siempre se debe comparar la nube A con la nube B, prestando especial atención a sectores que tengan un aspecto muy fracturado con presencia de discontinuidades de menor tamaño y que estas no hayan sido clasificadas por el software. En estos casos, como no es posible modificar los resultados entregados por DSE, se recomienda tener cuidado con las interpretaciones.

De manear adicional, las orientaciones de los sets de discontinuidades también podrán ser utilizadas para realizar un análisis cinemático del macizo rocoso estudiado.

3.5 CUARTA ETAPA

Finalmente, teniendo ambas nubes de puntos (nube A y nube B) se podrá clasificar el macizo rocoso según los sistemas de clasificación que se quieran utilizar y que sean adecuados para la escala de trabajo.

Se recomienda realizar un levantamiento de datos geotécnicos antes de clasificar el macizo rocoso. Por esto, se elaboró una ficha de levantamiento de datos para la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital (apartado 3.5.1).

3.5.1 Ficha de levantamiento de datos

A continuación, se presenta la ficha de levantamiento de datos para la clasificación de macizo rocoso (Figura 17). Esta ficha debe ser completada con datos sobre el tipo de afloramiento, tipo de roca, estructura del macizo, tamaño y tipo de bloques, grado de meteorización, RQD, sets principales, condición de humedad, presencia de nieve y condición de las discontinuidades. Una vez completada, la información servirá para clasificar el macizo rocoso según los distintos sistemas de clasificación.

Ficha de levantamiento de datos geotécnicos para la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital

Información General

Comuna:	Fecha:
Región:	Levantado por:
Ubicación de referencia:	Proyecto:
Coordenadas UTM:	Huso:
Dimensiones del afloramiento:	

Tipo de afloramiento	
Natural	
Corte/talud	
Excavación subterránea	
Trinchera/pique	

Tipo de roca	
Glaciar	
Ígnea intrusiva	
Metamórfica no foliada	
Estratificadas (volcánicas - sedimentarias)	
Metamórfica foliada	
Zona de alteración	

Estructura del macizo	
De acuerdo con GSI (Hoek & Marinos, 2000)	
Masivo	
Blocoso	
Muy blocoso	
Perturbado	
Desintegrado	
Laminado/cizallado	

Condición de las discontinuidades	
Espaciamiento	
Largo	
Apertura	
Rugosidad	
Relleno	

Tamaño de bloques (cm)		%
Dominante		
Máximo		
Mínimo		

Tipo de bloques	
Irregulares	
Cúbicos	
Tabulares	
Prismáticos	

Grado de meteorización	
Fresca/sana	
Levemente meteorizada	
Moderadamente meteorizada	
Altamente meteorizada	
Desintegrada	

RQD	
Establecer un rango solo si es posible calcularlo directamente o si se tienen datos de bibliografía/terreno	
90 - 100%	
75 - 90%	
50 - 75%	
25 - 50%	
< 25%	
No se puede calcular de forma directa	

Sets principales	
Tipo	Orientación

Tipo de discontinuidades	
1	Estratificación
2	Foliación/clivaje
3	Diaclasa
4	Falla
5	Grieta de tracción

Humedad natural	
Seco	
Húmedo	
Mojado	
Goteando	
Fluyendo	

Presencia de nieve	
Nula	
Esporádica	
Estacional	
Continua	

Condición de las discontinuidades (Bieniawski, 1989)						
Espaciamiento	>2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	<0,06 m	
Largo	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m	
Apertura	Nula	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm	N.A.*
Rugosidad	MR	R	LR	S	P	N.A.*
Relleno	Sin relleno	Duro	Blando	<5 mm	>5 mm	N.A.*

*No Aplica. En la mayoría de los casos es posible que no se pueda determinar un valor concreto para apertura, rugosidad y relleno

Figura 17: Ficha de levantamiento de datos geotécnicos

Respecto a la forma de obtención de estas características, se sugiere lo siguiente:

- *Tipo de afloramiento*: Observable en las fotografías y en la nube A.
- *Tipo de roca*: Se deben tener en cuenta la/s litología/s determinada/s en la descripción general del macizo rocoso, de la etapa 2 de la metodología.
- *Tamaño de bloques y porcentajes*: El tamaño puede ser obtenido al analizar la nube A, midiendo o estimando los tamaños con la escala de *CloudCompare*. La distribución porcentual se determina observando la nube A y/o las fotografías.
- *Tipo de bloques*: Observables en las fotografías y en la nube A.
- *Grado de meteorización*: Se puede estimar observando la nube A y las fotografías, prestando especial atención a la coloración de las superficies. Mayores detalles en el apartado 3.5.2.4.
- *Sets principales y tipo de discontinuidades*: Se determinan a partir de lo obtenido del análisis estructural con DSE.
- *Estructura del macizo*: Se puede identificar la cantidad de sets de discontinuidades observando la nube B, y el aspecto puede determinarse observando la nube A, considerando el tipo y tamaño de bloques, y el grado de meteorización identificados. Mayores detalles en el apartado 3.5.3.
- *RQD*: Dependerá de la resolución de la nube de puntos. Si no es posible calcularlo directamente como se especifica en el apartado 3.5.2.2, se aproximará a partir de bibliografía. Si no hay información bibliográfica se debe marcar que no es posible calcularlo de forma directa y estimarlo posteriormente a través de su relación con el GSI.
- *Humedad natural*: Se puede estimar a partir de la observación de la nube A y las fotografías del macizo rocoso, tal como se menciona en el apartado 3.5.2.5.
- *Presencia de nieve*: Se puede determinar a partir de la observación de imágenes históricas de la zona de estudio, por ejemplo, en Google Earth.
- *Condición de las discontinuidades*: El espaciamiento puede ser medido con *CloudCompare*, tal como se explica en el apartado 3.5.2.3. El largo también puede ser medido o estimado en *CloudCompare*. La apertura, la rugosidad y el relleno no podrán ser estimados directamente. Para estos casos, se deberá complementar con bibliografía, pero es probable que no se pueda determinar un valor específico para estos parámetros, dejándolos como “N.A.” en la ficha de levantamiento de datos geotécnicos.

3.5.2 RMR con fotogrametría

Para el cálculo del RMR, se deben evaluar seis parámetros asociados a sus respectivos puntajes:

- Resistencia de la roca intacta: de 0 a 15 puntos.
- RQD: de 0 a 20 puntos
- Espaciamiento entre las discontinuidades: de 0 a 20.
- Condición de las discontinuidades: de 0 a 30 puntos.
 - persistencia, apertura, rugosidad, relleno, meteorización: de 0 a 6 puntos cada uno.
- Condiciones generales de agua: de 0 a 15 puntos.

De esta forma, la calidad del macizo rocoso quedará dada por las siguientes clases:

- Clase I: 100-81 puntos, roca de muy buena calidad.
- Clase II: 80-61 puntos, roca de buena calidad.
- Clase III: 60-41 puntos, roca de calidad regular.
- Clase IV: 40-21 puntos, roca de mala calidad.
- Clase V: <21 puntos, roca de muy mala calidad.

A continuación se detalla el procedimiento para estimar cada uno de los parámetros asociados al cálculo del RMR.

3.5.2.1 Resistencia de la matriz rocosa

Usualmente, la resistencia de la roca intacta se estima a través de ensayos de laboratorio, como ensayos de carga puntual o ensayos de compresión simple. En este caso, la fotogrametría por sí sola no permite la estimación completa de este índice, pero puede entregar una idea general.

Analizando la nube de puntos 3D del afloramiento se puede hacer una inspección visual de la roca con la que se esté trabajando. Estas observaciones podrían entregar una idea de la litología de la zona, junto con sus condiciones geológicas, como grado de meteorización y fracturamiento.

Cabe destacar que para esta parte del estudio se necesita experiencia previa en identificación visual de litologías, siendo capaz de hacerse una idea “simplificada” de la litología a la que podría corresponder, pudiendo hacer la relación de la litología con una resistencia aproximada.

A su vez, son fundamentales los datos bibliográficos de la zona de estudio, de mapas geológicos o estudios previos de la zona de estudio. Estos podrían entregar una idea más concreta sobre la litología de la zona o directamente, sobre parámetros geotécnicos, como la resistencia. Como esta metodología se enfoca en el estudio remoto, es probable

que no existan datos previos tan concretos como los mencionados, por ende, se deberá hacer la estimación aproximada principalmente a través de inspección visual de la nube de puntos 3D.

Una vez identificada la litología, se deberá encontrar en referencias bibliográficas la resistencia aproximada según el tipo de roca. Sin embargo, esto será netamente una aproximación de baja confiabilidad, por lo que se recomienda no sobreestimar este parámetro.

Los puntajes asociados a la resistencia de la roca intacta serán dados por (Bieniawski, 1989):

- 15 puntos: >250 MPa (UCS) o >10 MPa (Is)
- 12 puntos: 100-250 MPa (UCS) o 4-10 MPa (Is)
- 7 puntos: 50-100 MPa (UCS) o 2-4 MPa (Is)
- 4 puntos: 25-50 MPa (UCS) o 1-2 MPa (Is)
- 2 puntos: 5-25 MPa (UCS)
- 1 punto: 1-5 MPa (UCS)
- 0 puntos: <1 MPa (UCS)

Es importante destacar que en caso de que los rangos de resistencia encontrados para la litología de la zona sean muy amplios, es decir, abarquen más de una de las categorías anteriores, quedará a criterio de la/el profesional a cargo identificar un puntaje representativo, siempre evitando sobreestimar el RMR.

3.5.2.2 RQD

Como se menciona en el apartado 3.1.1, este parámetro se utiliza en pequeñas escalas, por lo que es probable que los cálculos de RQD de forma remota sean poco confiables en casos de estudio de mayor escala. Es por esto que se recomienda utilizar con precaución evitando la sobreestimación de la calidad del macizo rocoso. Incluso se recomienda no calcular el RQD para escalas que no logren ser lo suficientemente detalladas, sustituyéndolo por una estimación a partir del GSI, según la relación propuesta por Hoek et al. (2013).

En primer lugar, se puede calcular el espaciamiento medio de las discontinuidades de un mismo set utilizando el programa *CloudCompare*, donde las nubes de puntos A y B son utilizadas para contabilizar manualmente la cantidad de discontinuidades de un mismo set.

Una vez obtenida la cantidad de discontinuidades, se calcula el espaciamiento medio:

$$S_i = \frac{L_i}{C_i}$$

Ecuación 10

Donde:

- L_i : largo del tramo analizado.
- C_i : cantidad de discontinuidades en el tramo analizado.

Para una mayor precisión y exactitud, se puede realizar este procedimiento en distintas zonas del afloramiento estudiado, donde el espaciamiento medio quedará dado por el promedio de los espaciamientos medios calculados. De esta forma, se puede calcular el J_v y, por ende, el RQD, utilizando la fórmula de Palmstrom (2005) (Ecuación 2).

Cabe destacar que la facilidad y precisión de la obtención del número de discontinuidades por tramo dependerá directamente de la resolución de la nube de puntos 3D utilizada. Una resolución muy baja dificultará esta tarea, pudiendo haber casos en los que haya discontinuidades pequeñas que se observen en la nube de puntos original, que no lleguen a ser clasificadas en ninguno de los sets entregados por DSE.

Los puntajes asociados al RQD quedarán dados por (Bieniawski, 1989):

- 20 puntos: 90-100% RQD
- 17 puntos: 75-90% RQD
- 13 puntos: 50-75% RQD
- 8 puntos: 25-50% RQD
- 3 puntos: <25% RQD

3.5.2.3 *Espaciamiento entre las discontinuidades*

El espaciamiento puede ser medido directamente de la nube de puntos original o categorizada. El propósito de este parámetro es identificar el tamaño de los bloques de roca que conforman el macizo rocoso.

Se propone realizar un conteo manual en distintas zonas del afloramiento definiendo líneas de detalle e identificando todas las discontinuidades que corten cada línea de detalle sin importar la familia a la que pertenezcan. Las líneas de detalle pueden ser dibujadas directamente en CloudCompare, al seleccionar la herramienta "*Lineation Tool*" que permite la medición de distancias entre dos puntos de la nube de puntos, quedando dibujada en el software.

De esta forma se obtendrán diferentes espaciamientos que pueden ser promediados. Los puntajes asociados a este parámetro estarán dados por (Bieniawski, 1989):

- 20 puntos: >2 m
- 15 puntos: 0,6-2 m
- 10 puntos: 200-600 mm
- 8 puntos: 60-200 mm
- 5 puntos: <60 mm

3.5.2.4 *Condición de las discontinuidades*

En primer lugar, la persistencia (largo) puede ser medida de la nube de puntos manualmente. Se recomienda medir la mayor cantidad de discontinuidades. Los puntajes quedarán dados por (Bieniawski, 1989):

- 6 puntos: <1 m
- 4 puntos: 1-3 m
- 2 puntos: 3-10 m
- 1 puntos: 10-20 m
- 0 puntos: >20 m

En segundo lugar, la meteorización de las paredes de las discontinuidades debe ser estimada observando la apariencia del macizo rocoso en la nube de puntos, apoyándose en las imágenes utilizadas para la obtención de la nube de puntos. Se debe prestar especial atención a la coloración de la roca, principalmente, en los planos de discontinuidades. Una roca fresca o poco meteorizada presentará un color homogéneo y/o poco decolorado, mientras que rocas más meteorizadas podrían presentar decoloración o manchas rojizas (por óxidos de hierro), así como un aspecto más fracturado o deteriorado. La determinación del grado de meteorización es cualitativa y queda a criterio de la persona a cargo del estudio, al igual que como se haría en terreno. Los puntajes quedarán dados por (Bieniawski, 1989):

- 6 puntos: No meteorizadas
- 5 puntos: Levemente meteorizadas
- 3 puntos: Moderadamente meteorizadas
- 1 puntos: Altamente meteorizadas
- 0 puntos: Descompuestas

Como se menciona en el apartado 3.1.1, la apertura, rugosidad y relleno de las discontinuidades no serán posibles de identificar en gran parte de los casos, por ende, el RMR quedará expresado dentro de un rango de variación, el cual puede ser limitado dependiendo de la información adicional con la que se cuente.

De forma alternativa, se propone estimar el puntaje total asociado a la condición de las discontinuidades a partir del GSI, según lo propuesto por Hoek et al. (2013), siguiendo la escala de la Figura 2. De ser utilizada, también se trabajaría con rangos de RMR, pues se recomienda estimar el GSI en intervalos.

3.5.2.5 Agua

Las condiciones generales de agua se determinarán a partir de la observación de las imágenes y de la nube de puntos. El agua en las discontinuidades podría evidenciarse por presencia de vegetación abundante en las fracturas, charcos en las cercanías del macizo rocoso o manchas en la roca que presenten formas similares al escurrimiento de agua. También, se podrá complementar con datos del nivel piezométrico de la zona, observación de imágenes satelitales o cualquier dato adicional, si existiesen.

Es importante destacar que el RMR no considera la acción de nieve o hielo. Sin embargo, estos sí pueden afectar a la estabilidad del macizo rocoso empeorando su calidad. Por lo tanto, para zonas montañosas o que presenten nieve, se recomienda calcular dos RMR distintos, uno que no considere la presencia de nieve o hielo y otro que sí la considere.

Los puntajes asociados a la presencia de agua quedarán dados por (Bieniawski, 1989):

- 15 puntos: Completamente seco
- 10 puntos: Húmedo
- 7 puntos: Mojado
- 4 puntos: Goteando
- 0 puntos: Fluyendo

Los puntajes de la condición de agua, en caso de considerar la presencia de nieve, no deben regirse por los puntajes mencionados arriba, sino que serán:

- 7 puntos: Presencia de nieve esporádica
- 4 puntos: Presencia de nieve estacional
- 0 puntos: Presencia de nieve constante

Esta es una forma de calcular un RMR bajo condiciones de agua normales (sin considerar la nieve) y otro RMR “castigado” por la presencia de nieve.

3.5.3 GSI con fotogrametría

El GSI puede ser calculado de forma similar a como se realiza en terreno. Por un lado, se deben identificar los sets de discontinuidades para determinar la condición estructural del macizo rocoso. Para esto, se recomienda observar la nube de puntos original y categorizada por DSE, así como las imágenes utilizadas para la construcción de la nube de puntos. Cabe destacar que la nube de puntos categorizada ayuda a identificar más rápidamente la cantidad de sets de discontinuidades afectando a la zona estudiada.

Por otro lado, se debe identificar la condición de las superficies observando su apariencia en la nube de puntos original, apoyándose en las imágenes utilizadas para la confección de la nube de puntos. Se debe prestar especial atención a la coloración de la roca, viendo si es homogénea, si presenta decoloración o manchas. Respecto a la rugosidad, puede estimarse si se trabaja con imágenes de resolución milimétrica. Para resoluciones centimétricas o métricas, no podrá ser obtenida de forma directa, pero podría estimarse a partir de bibliografía o de la observación de las fotografías. Sin embargo, esta aproximación podría ser de baja confiabilidad.

Para la obtención del GSI, se recomienda establecerlo en intervalos y no como un valor específico, el cual variará dependiendo de la escala de trabajo. Mientras más detallada sea la escala, menor podría ser el intervalo utilizado. Como se menciona en el apartado 3.1.2, la recomendación general es trabajar con intervalos que abarquen por completo una categoría de la condición de las superficies y de las estructuras.

De esta forma, se tendrá un rango lo suficientemente acotado de acuerdo a la escala y resolución de la nube de puntos utilizada. Cabe destacar que a menor escala, mayor será la resolución, por ende, se podría estimar la rugosidad y la condición estructural de macizo rocoso de mejor manera, pudiendo establecer intervalos más pequeños que los mencionados anteriormente. De todas maneras, esto quedará a criterio del personal a cargo del estudio, destacando que el GSI es una clasificación cualitativa e incluso en terreno la clasificación de un macizo rocoso podría variar dependiendo de la persona que lo haya realizado.

De acuerdo con la relación propuesta por Hoek et al. (2013), el cálculo del GSI a partir de la observación de la nube de puntos puede servir para el cálculo del RMR, pero debe utilizarse con precaución.

4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA QUEBRADA LO CAÑAS, REGIÓN METROPOLITANA

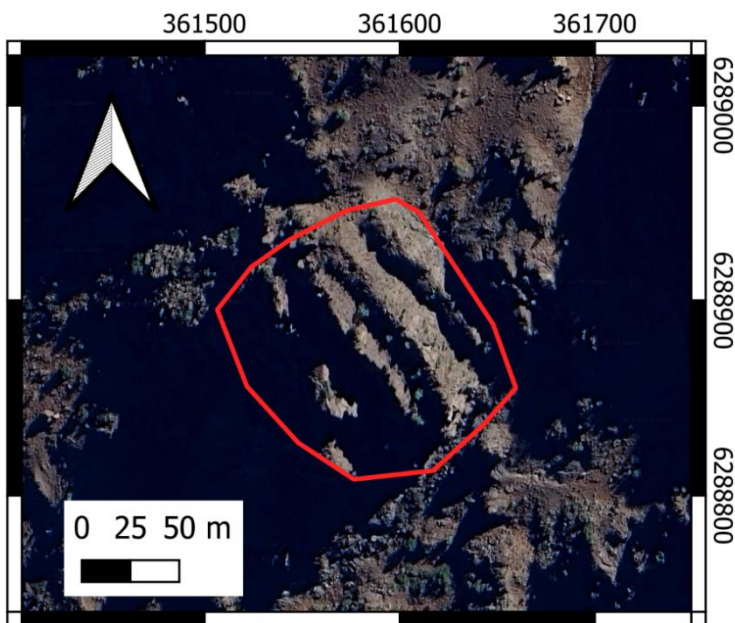
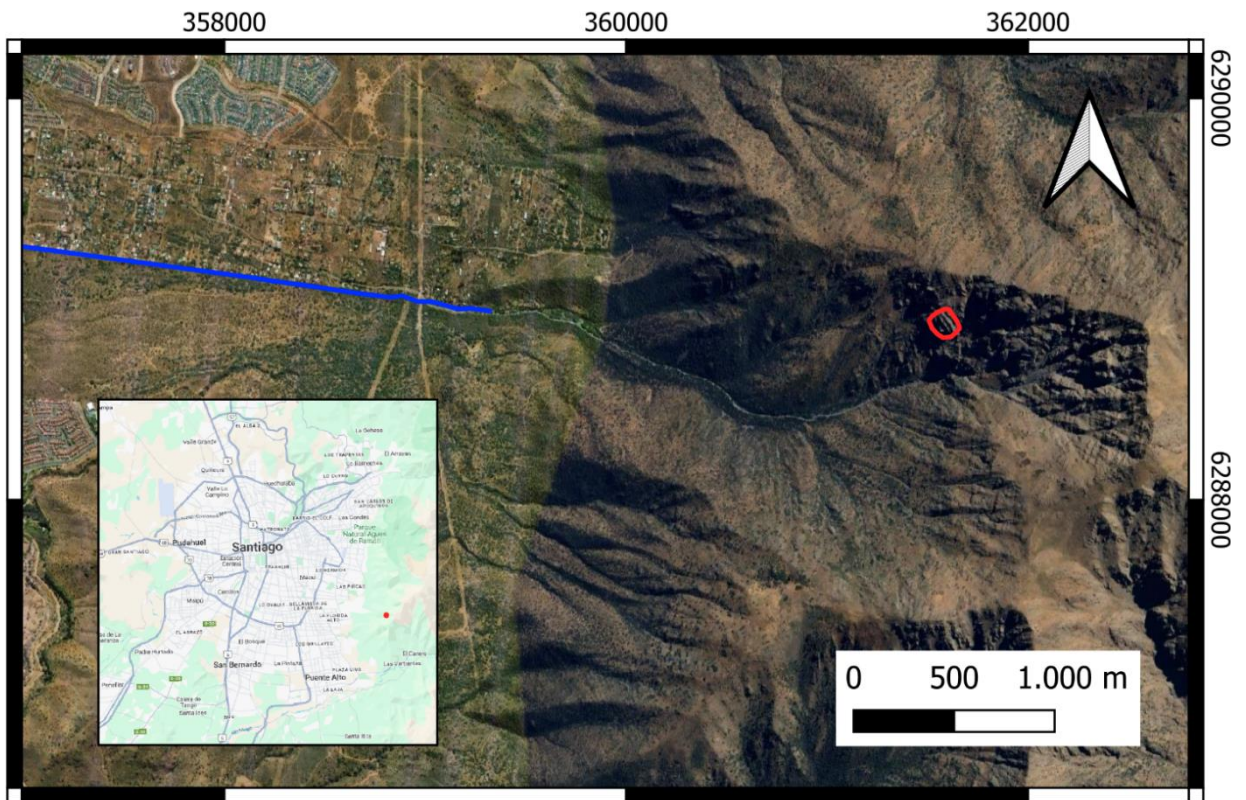
4.1 PRIMERA ETAPA

Se contaba con fotografías de un afloramiento de la quebrada Lo Cañas, por lo que se decidió trabajar en esta zona. Para este trabajo, se realizó un estudio bibliográfico detallado del área, a partir de trabajos previos en la zona, especialmente Villarroel & Vergara (1988) y Sepúlveda (1998).

4.1.1 Ubicación y accesos

El área de estudio se ubica en la zona cordillerana de la comuna de La Florida, específicamente en la Quebrada Lo Cañas, a 19 km al sureste del centro de Santiago, en la Región Metropolitana (Figura 18). El afloramiento estudiado se ubica en el inicio de la quebrada, en las coordenadas 361562.61 mE - 6288854.78 mN (WGS84, Huso 19S) y abarca un área de 9730 m².

A la Quebrada Lo Cañas puede accederse directamente desde la calle Longitudinal Sur (Figura 18). Sin embargo, para llegar a la zona de estudio se debe ascender por la quebrada unos 2,7 km. El acceso a este afloramiento puede ser difícil y peligroso, por ende, clasifica dentro del tipo de afloramiento donde el uso de fotogrametría facilitaría el trabajo de clasificación de macizo rocoso.



Simbología

- Zona de estudio
- Longitudinal Sur

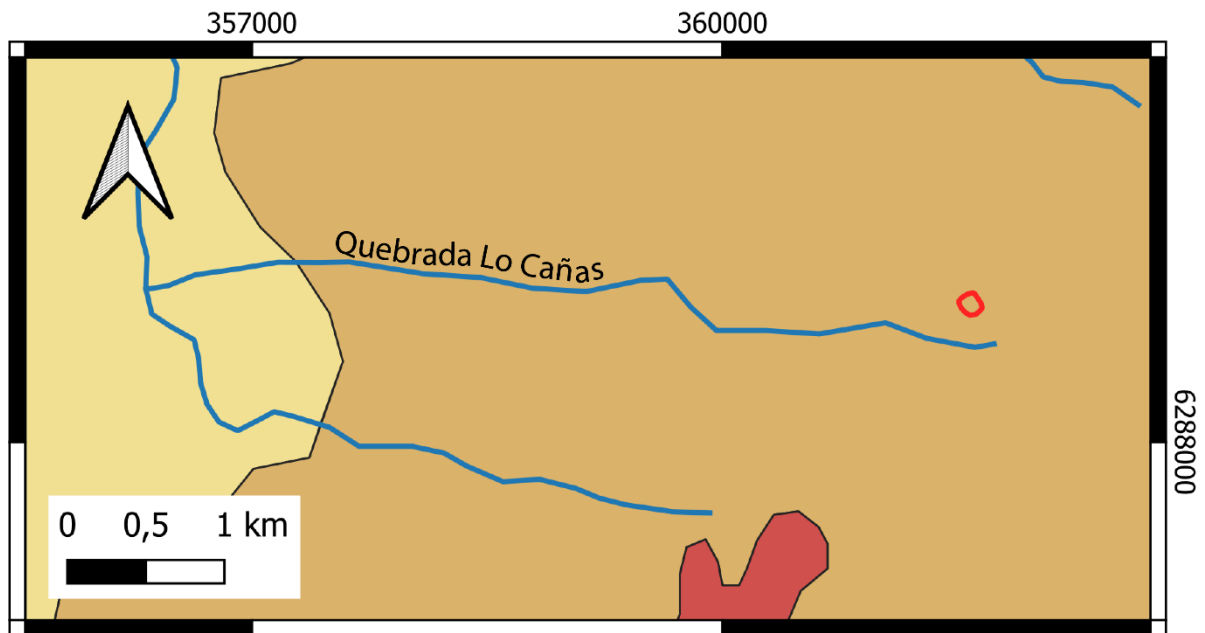
Fuentes: Google Roads
 Google Satellite

Datum: WGS84 Huso 19S

Figura 18: Mapa de ubicación de la zona de estudio y vías de acceso. Elaboración propia en QGis

4.1.2 Marco Geológico

El afloramiento estudiado en este trabajo corresponde a rocas de la Formación Abanico (Figura 19).



Simbología

- Zona de estudio
- Red de drenaje

Datum: WGS84 Huso 19S

Leyenda

- Depósitos fluviales, fluvio-glaciares, aluviales, lacustres y gravitacionales; incluye depósitos de cenizas volcánicas
- Unidad intrusiva I:
Granodioritas, monzogranitos y monzonitas cuarcíferas
- Formación Abanico:
Rocas volcánicas, principalmente andesitas y riolitas, con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales

Figura 19: Mapa Geológico de la quebrada Lo Cañas. Adaptada de Thiele (1980)

4.1.2.1 Formación Abanico

Se define como una secuencia de vulcanitas y sedimentitas clásticas terrígenas. Está formada por tobas y brechas volcánicas, con intercalaciones de lavas y rocas sedimentarias clásticas. Las lavas son andesitas y riolitas, y las rocas sedimentarias corresponden a areniscas de grano medio a fino, lutitas y limos finamente estratificados (Thiele, 1980).

La Formación Abanico en sus localidades tipo (cerro Abanico y San Ramón) presenta un espesor máximo de 1900 m, donde su base no aparece expuesta y su techo está dado por la superficie de erosión actual. Presenta tres miembros, uno superior formado principalmente por tobas y areniscas volcánicas, uno intermedio formado por andesitas y brechas andesíticas, y uno inferior compuesto por areniscas y tobas (Villarroel & Vergara, 1988).

Respecto a las alteraciones, las rocas de la Formación Abanico están todas medianamente alteradas, con ceolitización y cloritización en distintos grados (Thiele, 1980). En los sectores del cerro Abanico y San Ramón, los estratos que mantean hacia el E se encuentran alterados principalmente con epidota, clorita y pumpellyta (Villarroel & Vergara, 1988).

4.1.3 Antecedentes geotécnicos

Sepúlveda (1998) estudió la quebrada Lo Cañas para la aplicación de su metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos. En la descripción de las rocas de la Formación Abanico en la quebrada destaca que las rocas estratificadas están controladas por cuatro sets de fracturas principales: N115°E/75°S, N54°E/65°N, EW/subvertical y N80°E/26°S. Además, menciona que las fracturas en su mayoría están abiertas, sin relleno y con espaciamientos entre 0,2 y 2 m.

Respecto a los cuerpos ígneos dentro de la Formación Abanico, Sepúlveda (1998) menciona que los sets predominantes son: N20°E/32°E, N30°E/70°S, N32°E/33°S y N52°E/84°N, donde las fracturas también están principalmente abiertas, con algunas rellenas de calcita.

Dentro de su trabajo, Sepúlveda (1998) estudió diferentes sectores críticos para la aplicación de su metodología, específicamente, el Sector Crítico 1 (Figura 20) abarca la zona de estudio del presente trabajo. Se menciona que los estratos de la Formación Abanico se encuentran meteorizados y fracturados generando abundante material detrítico de amplio rango granulométrico.

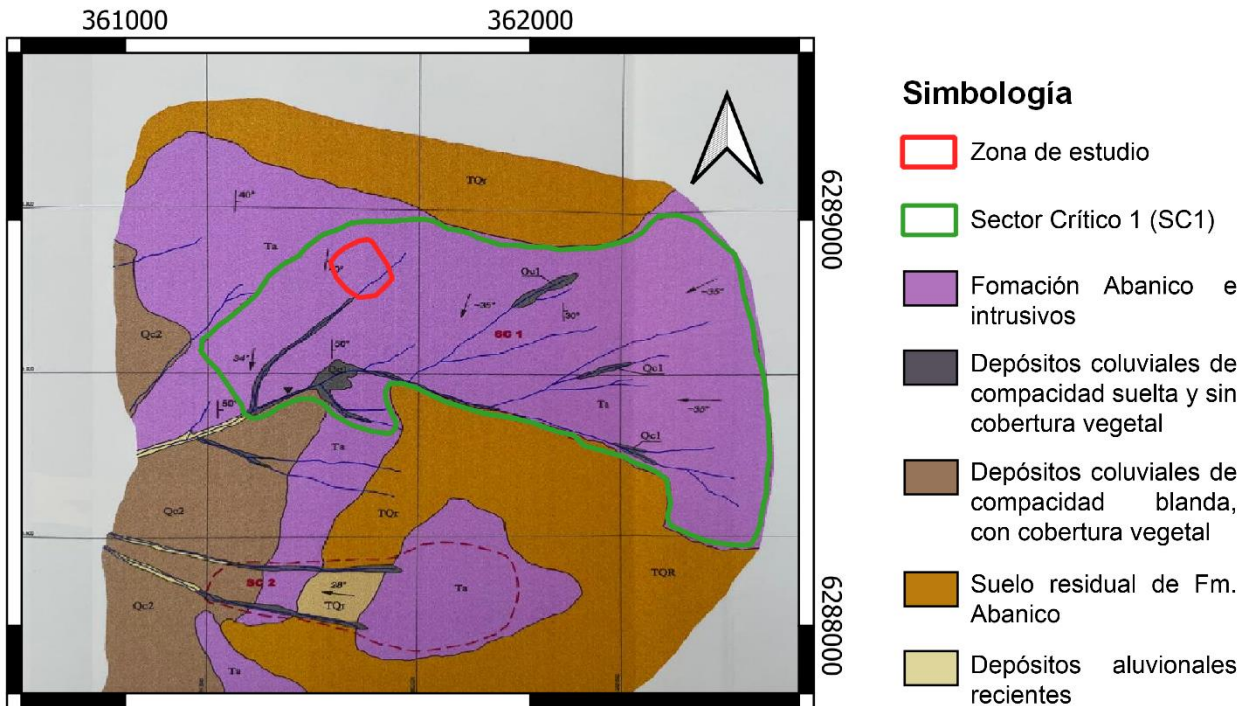


Figura 20: Sector Crítico 1 y zona de estudio. Adaptado de Sepúlveda (1998)

4.2 SEGUNDA ETAPA

4.2.1 Construcción de la nube de puntos

Para la construcción de la nube de puntos 3D, se contó con 42 fotografías del afloramiento (ANEXO A), las cuales fueron tomadas el 16 de noviembre de 2023, siguiendo los requerimientos de *Agisoft Metashape* para la construcción de una nube de puntos.

Las imágenes fueron cargadas al programa y se construyó la nube de puntos 3D siguiendo los pasos mencionados en el apartado 2.3.1, teniendo en cuenta que las fotografías no requerían ser georreferenciadas porque fueron tomadas con un dron con antena RTK. Una vez construida, fue recortada en *CloudCompare* (versión 2.13.1) para seleccionar el área específica del afloramiento que se estudiaría, pues la nube de puntos completa abarcaba sectores alejados, con vacíos y era demasiado pesada para ser procesada de forma óptima (Figura 21).

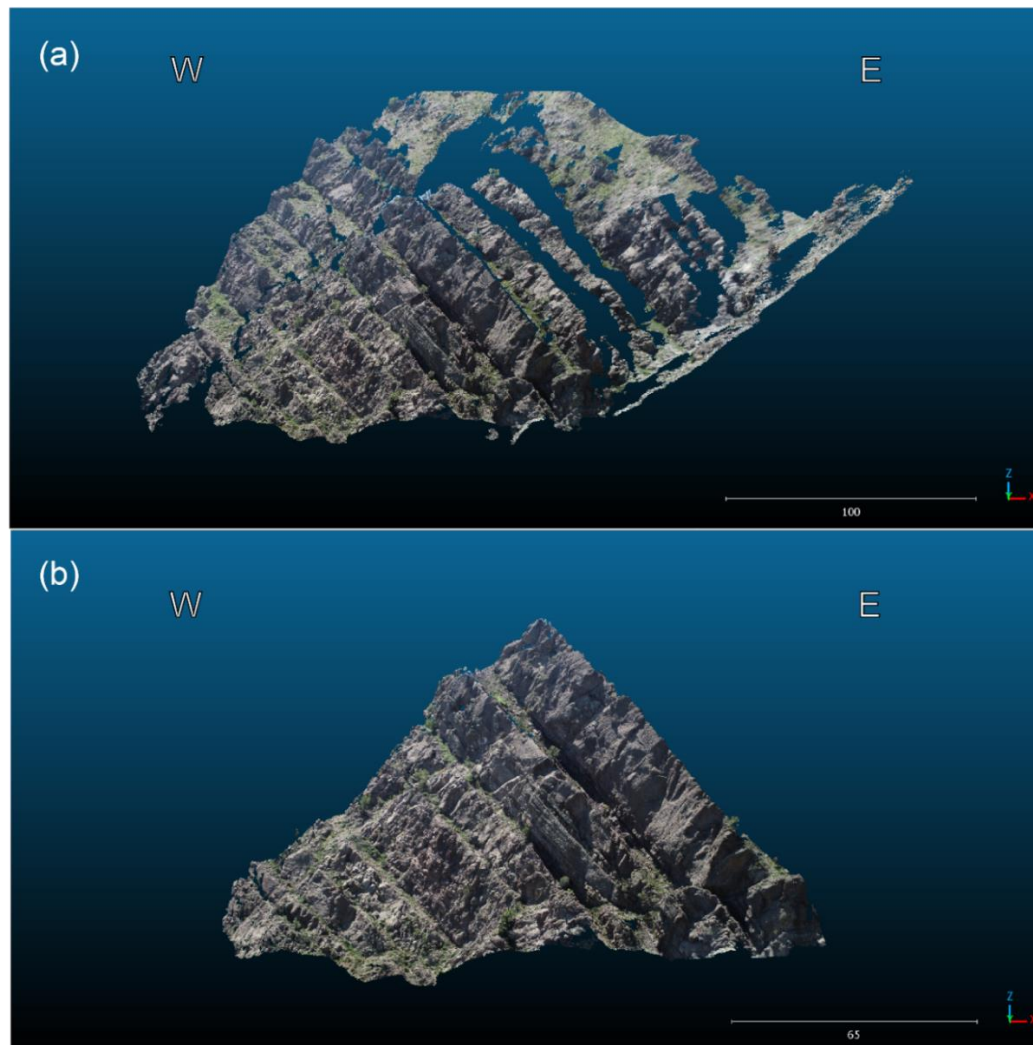


Figura 21: (a) Nube de puntos 3D completa. (b) Nube de puntos 3D recortada para el área de interés.

Esta nube de puntos fue la que se utilizó para el análisis estructural con *DSE*.

4.2.2 Descripción general y sectorización

La zona de estudio corresponde a un afloramiento rocoso de 150 m de ancho y 95 m de alto aproximadamente. Según bibliografía, corresponde a una secuencia de rocas estratificadas de la Formación Abanico. Los estratos presentan una orientación aproximada NS. Además, se identifican dos fallas, una en la zona occidental del afloramiento y otra en la zona oriental, ambas de orientaciones similares.

Antes de realizar la clasificación del macizo rocoso, se dividió el afloramiento en tres sectores, teniendo en cuenta que presentaban un aspecto notablemente diferente (Figura 22). Esta sectorización es esquemática, pero en *CloudCompare* se puede dividir la nube de puntos para tener cada sector en nubes de puntos distintas.

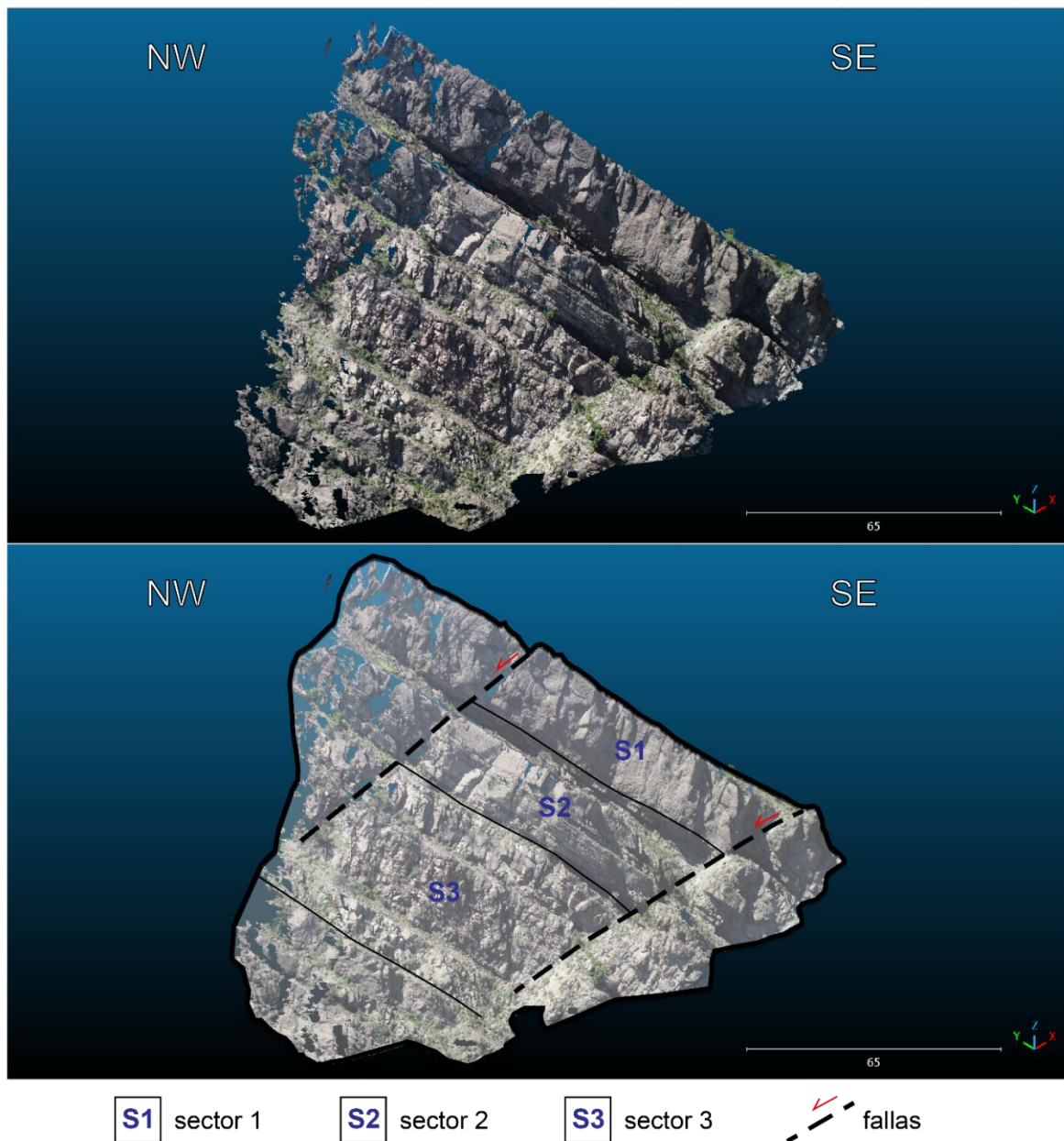


Figura 22: Sectorización del afloramiento estudiado

El *sector 1* presenta ~20 m de espesor. Es de color grisáceo, tiene un aspecto homogéneo y pareciera estar compuesto por una sola litología. Se ve menos fracturado en comparación a los otros sectores. Se encuentra en contacto concordante con el sector 2.

El *sector 2* tiene ~23 m de espesor. Hay rocas marrones y otras más grisáceas. Pareciera ser una intercalación de dos litologías distintas. La litología más grisácea pareciera ser la misma del sector 1 y presenta espesores que van de 6 m, en la parte superior de este sector, hasta menos de 50 cm hacia la base del sector. Los estratos marrones se encuentran mucho más fracturados que los estratos más grisáceos y presentan espesores que van de 1,5 m hasta menos de 50 cm. En general este sector está más fracturado que el sector 1 y se encuentra en contacto concordante con los sectores 1 y 3.

El *sector 3* posee ~45 m de espesor. Es de color marrón rojizo y grisáceo. Presenta un aspecto más fracturado que los otros sectores y pareciera estar formado por dos litologías. Las rocas más grisáceas podrían ser de la misma litología presente en los otros sectores, se encuentran como dos estratos de ~10 m de espesor y están más fracturadas en comparación a los otros sectores. Las rocas marrones rojizas podrían ser otro tipo de roca y se muestran como un estrato de 20 m de espesor, muy fracturado. Se encuentra en contacto concordante con el sector 2.

Considerando lo anterior, se podría decir que en el afloramiento hay *tres litologías* presentes. En primer lugar, se tienen rocas más grisáceas en las que se logra apreciar “puntos” negros y blanquecinos, que podrían corresponder a clastos (Figura 23, zonas A, B y E; Figura 24, zonas G, I y K). En el sector 2 la roca tiene un aspecto granulado, probablemente debido a una mayor erosión (Figura 23, zona C; Figura 24, zonas F y H). Las zonas A, B y E de la Figura 23 y las zonas G, I y K de la Figura 24 son bastante similares entre ellas, por ende, podrían corresponder a una misma litología.

Por otro lado, se tienen las rocas marrones presentes en el sector 2, de aspecto homogéneo, que aparecen como intercalaciones de espesores centimétricos a métricos (Figura 23, zonas C y D; Figura 24, zonas F y H). En las fotografías no se logran identificar clastos y parecieran ser rocas menos competentes que las rocas más grisáceas debido a que se encuentran muy fracturadas.

Por último, se tienen las rocas marrones rojizas del sector 3. En algunas zonas se aprecian clastos similares a los de las rocas grisáceas (Figura 24, zona G). Algunas de sus superficies parecieran tener un aspecto más liso, muy distinto al de las otras rocas (Figura 24, zona J).

Fotografía
DJI_0615

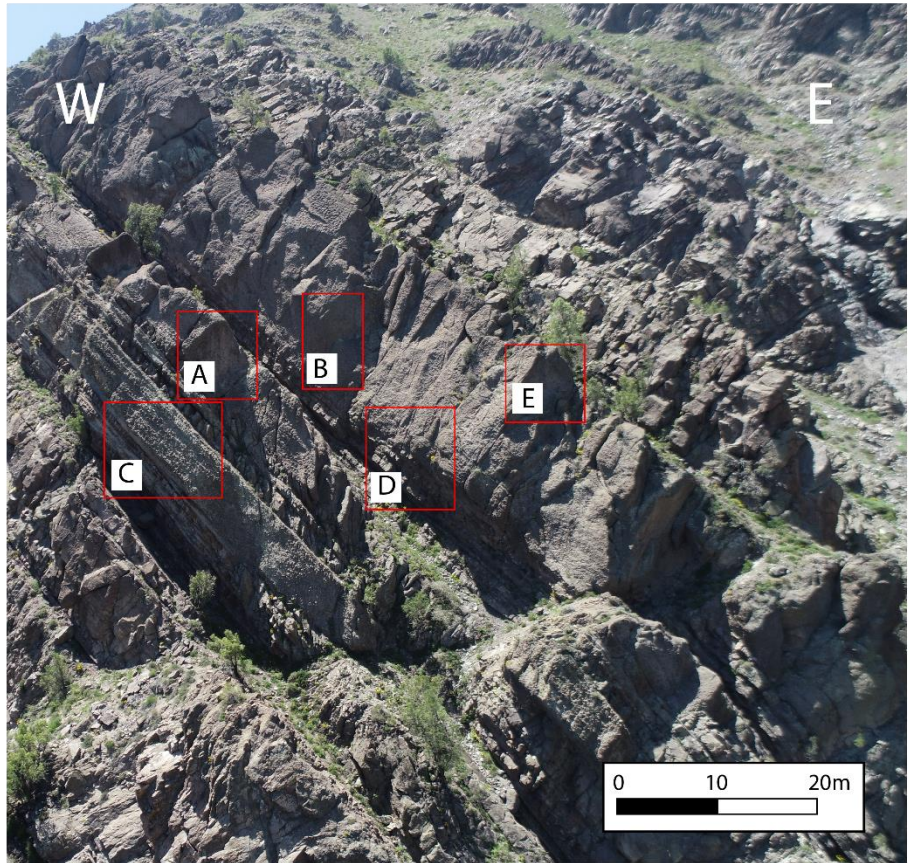


Figura 23: Distintas zonas del afloramiento usadas para identificar las litologías. A-B-E: roca grisácea con clastos negros y blanquecinos; C: roca grisácea con aspecto granuloso e intercalaciones de roca marrón; D: cambio de litología de roca más grisácea a roca marrón

Fotografía
DJI_0607

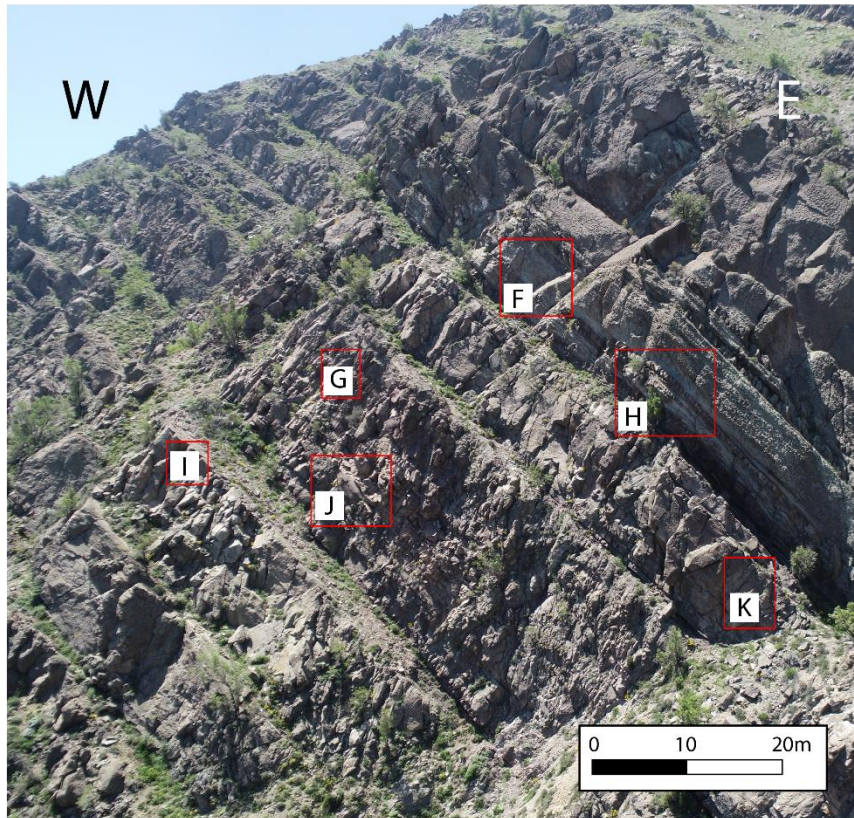


Figura 24: Distintas zonas del afloramiento usadas para identificar las litologías. F-H: roca grisácea de aspecto granuloso con intercalaciones de roca marrón; G: roca marrón rojiza con clastos negros y blancuecinos; I-K: roca grisácea con clastos negros y blancuecinos; J: roca marrón de aspecto más liso

Teniendo en cuenta la escala de las imágenes, las rocas grisáceas y marrones rojizas deberían ser una litología de grano grueso y las rocas marrones podrían ser de menor tamaño de grano.

Algunos de los datos recopilados por Villarroel & Vergara (1988) se ubican a ~5 km de distancia del afloramiento analizado en este trabajo, donde la Formación Abanico está compuesta principalmente por tobas, areniscas volcánicas, andesitas y brechas. Considerando esto, las rocas descritas anteriormente podrían corresponder a tobas (grisáceas y marrones rojizas) con intercalaciones de areniscas, perteneciendo al miembro superior descrito por estos autores.

Cabe destacar que esta clasificación corresponde a una suposición y que no se visitó el afloramiento directamente para observar las rocas desde cerca, por ende, la litología podría variar. En la Figura 25 se muestra un esquema del afloramiento considerando las litologías presentes.

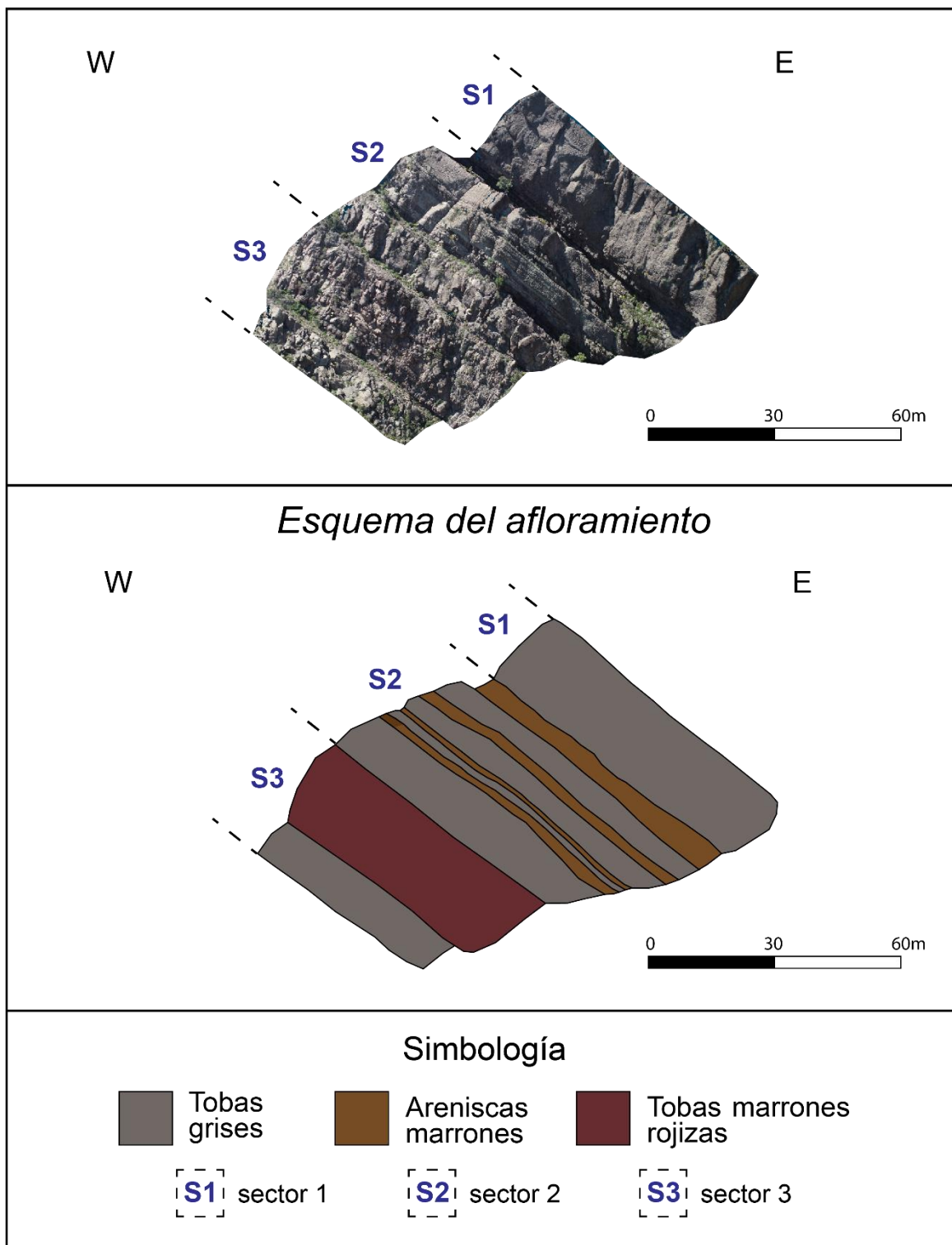


Figura 25: Esquema del afloramiento según las litologías identificadas

4.3 TERCERA ETAPA

4.3.1 Obtención de sets de discontinuidades

Para el análisis estructural se trabajó con los parámetros que vienen por defecto en el software *Discontinuity Set Extractor*, pues se consideró que eran valores acertados para el caso de estudio. Los pasos realizados se encuentran en el apartado 2.3.3.

El análisis estructural de la nube de puntos inicialmente entregó siete sets de discontinuidades (Tabla 9) y se obtuvo la primera nube de puntos categorizada (Figura 26). Es muy importante recalcar que estos sets deben ser examinados para determinar su validez, pues el software clasifica todos los puntos de la nube de puntos en algún set de discontinuidades. Esto podría llevar a la identificación de falsas familias de discontinuidades, por ejemplo, zonas de acumulación de suelo o zonas erosionadas con orientación similar podrían ser clasificadas erróneamente como sets de discontinuidades.

Tabla 9: Orientaciones aproximadas de los sets de discontinuidades entregados inicialmente por DSE

Set	Dip	Dip Direction
1	51	200
2	49	93
3	32	156
4	86	353
5	83	56
6	87	313
7	90	98

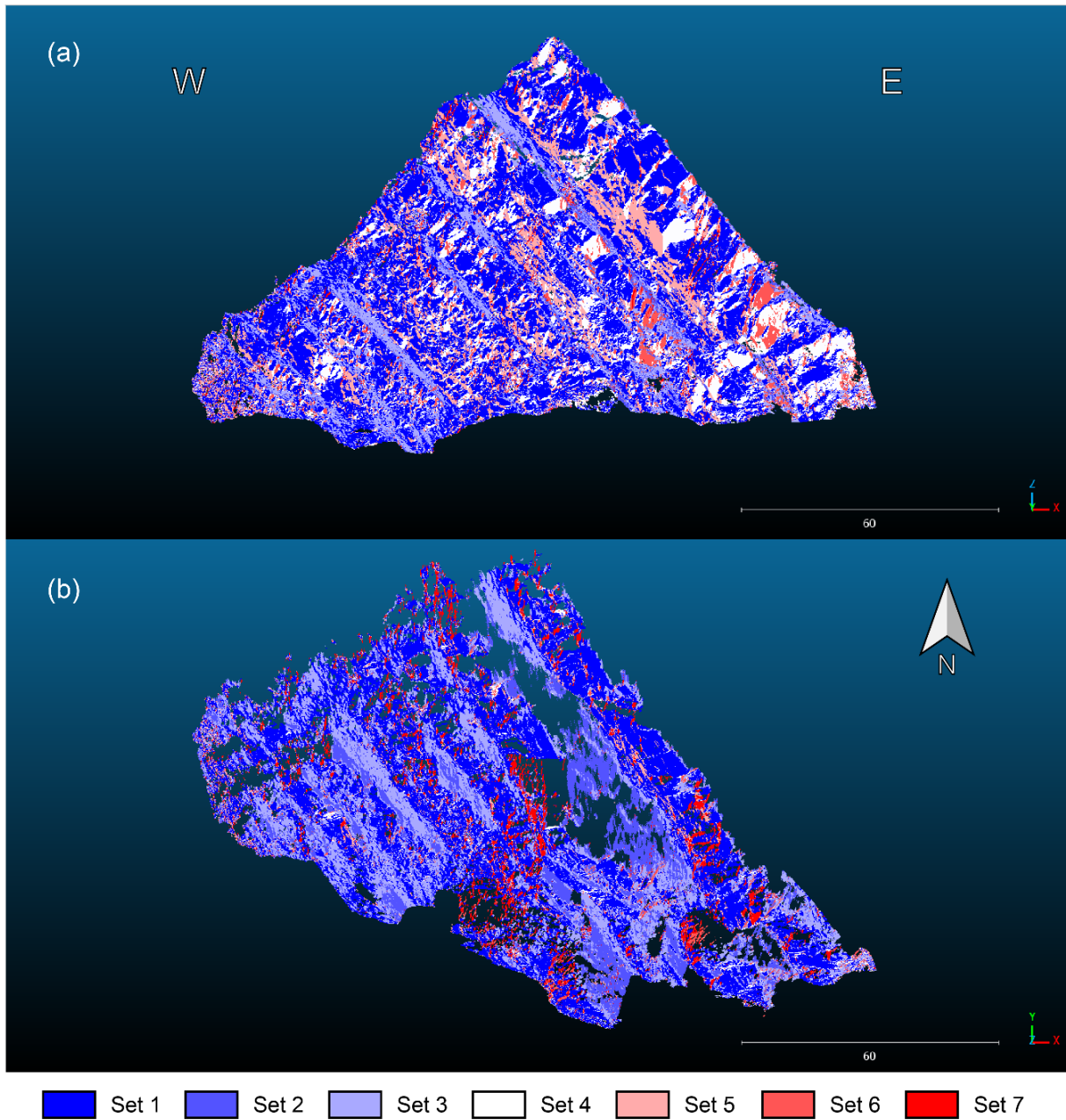


Figura 26: Nube de puntos categorizada según los sets de discontinuidades iniciales. (a) Vista frontal. (b) Vista en planta.

Luego de un análisis visual y comparación de la nube de puntos original con la nube de puntos categorizada, se determinó que los sets 1, 3 y 6 no correspondían a familias de discontinuidades. El set 1 se eliminó porque probablemente correspondía a zonas erosionadas con orientaciones similares. El set 3 se eliminó porque correspondía a zonas de acumulación de suelo y con vegetación, principalmente en los planos de estratificación que se observan en las imágenes del afloramiento. El set 6 se eliminó porque se presentaba en planos asociados al set 4, esto podría denotar rugosidad de las discontinuidades de este set.

Los sets que se consideraron finalmente fueron los sets 2, 4, 5 y 7. De aquí en adelante, estos sets serán renombrados como *set I*, *set II*, *set III* y *set IV*, respectivamente. El set I corresponde a los planos de estratificación de las rocas del afloramiento estudiado. El set II representa un set de diaclasas subverticales de rumbo aproximado EW. El set III corresponde a otro set de diaclasas subverticales, de orientación aproximada NW-SE, y el set IV corresponde a un set de diaclasas subverticales, casi perpendicular al set II, de rumbo aproximado NS. En la Tabla 10 se muestran las orientaciones de los sets y el tipo de discontinuidad asociado a cada uno. En la Figura 27 se tiene representación de los planos representativos de cada familia de discontinuidades en la red de Schmidt.

Tabla 10: Orientaciones de los sets de discontinuidades del afloramiento estudiado

Set	Dip	Dip Direction	Tipo
I	49	93	Estratificación
II	86	353	Diaclasas
III	83	56	Diaclasas
IV	90	98	Diaclasas

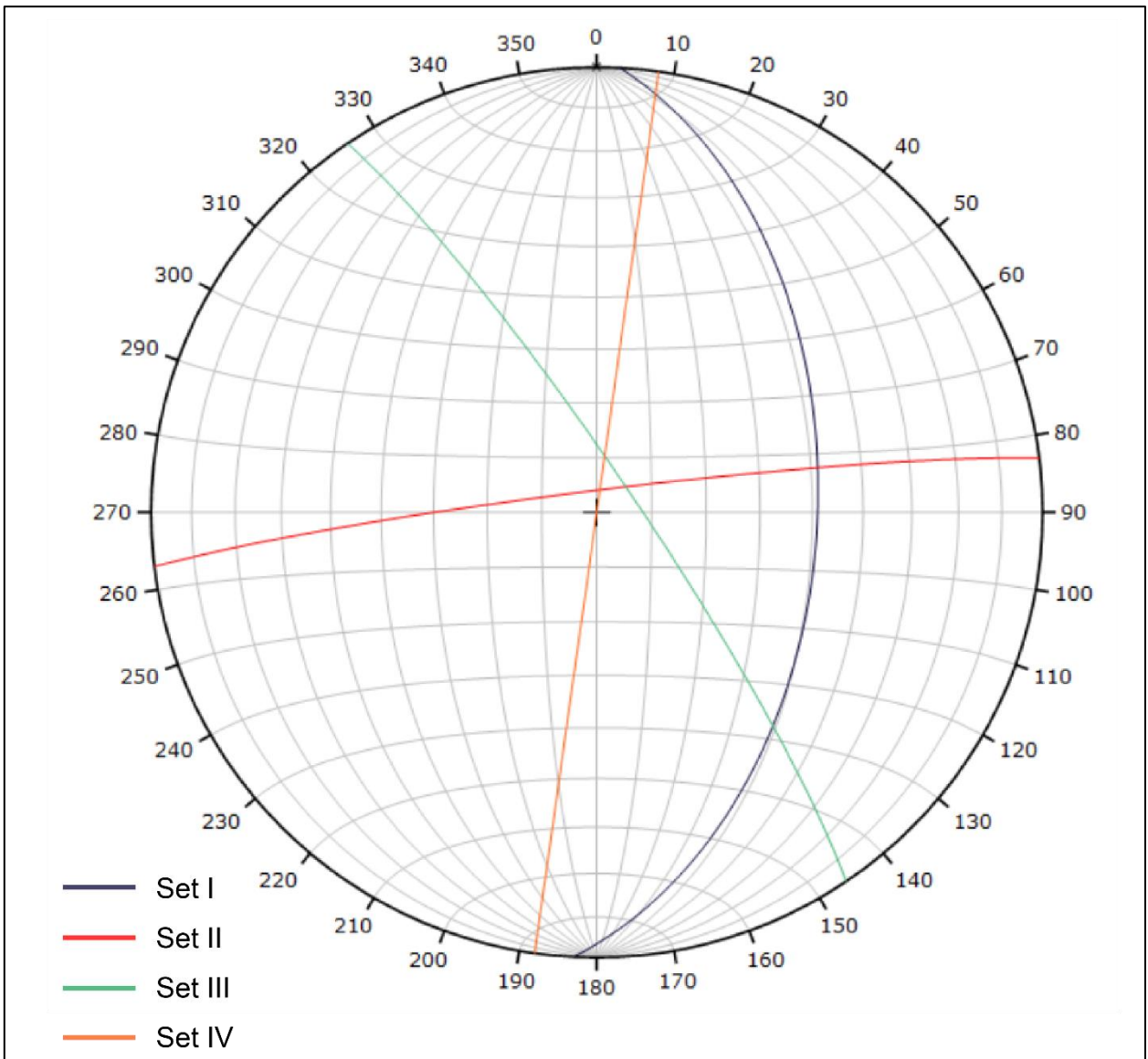


Figura 27: Representación de los sets de discontinuidades en la red de Schmidt

Con los sets I, II, III y IV se recategorizó la nube de puntos y se obtuvo la nube de puntos categorizada que se utilizó de ayuda para la clasificación del macizo rocoso según los distintos sistemas de clasificación (Figura 28).

Cabe destacar que distintos planos de discontinuidades fueron medidos con *CloudCompare* para corroborar las orientaciones de los sets entregados por *Discontinuity Set Extractor*. Estas mediciones realizadas a la nube de puntos fueron consistentes con lo entregado por DSE.

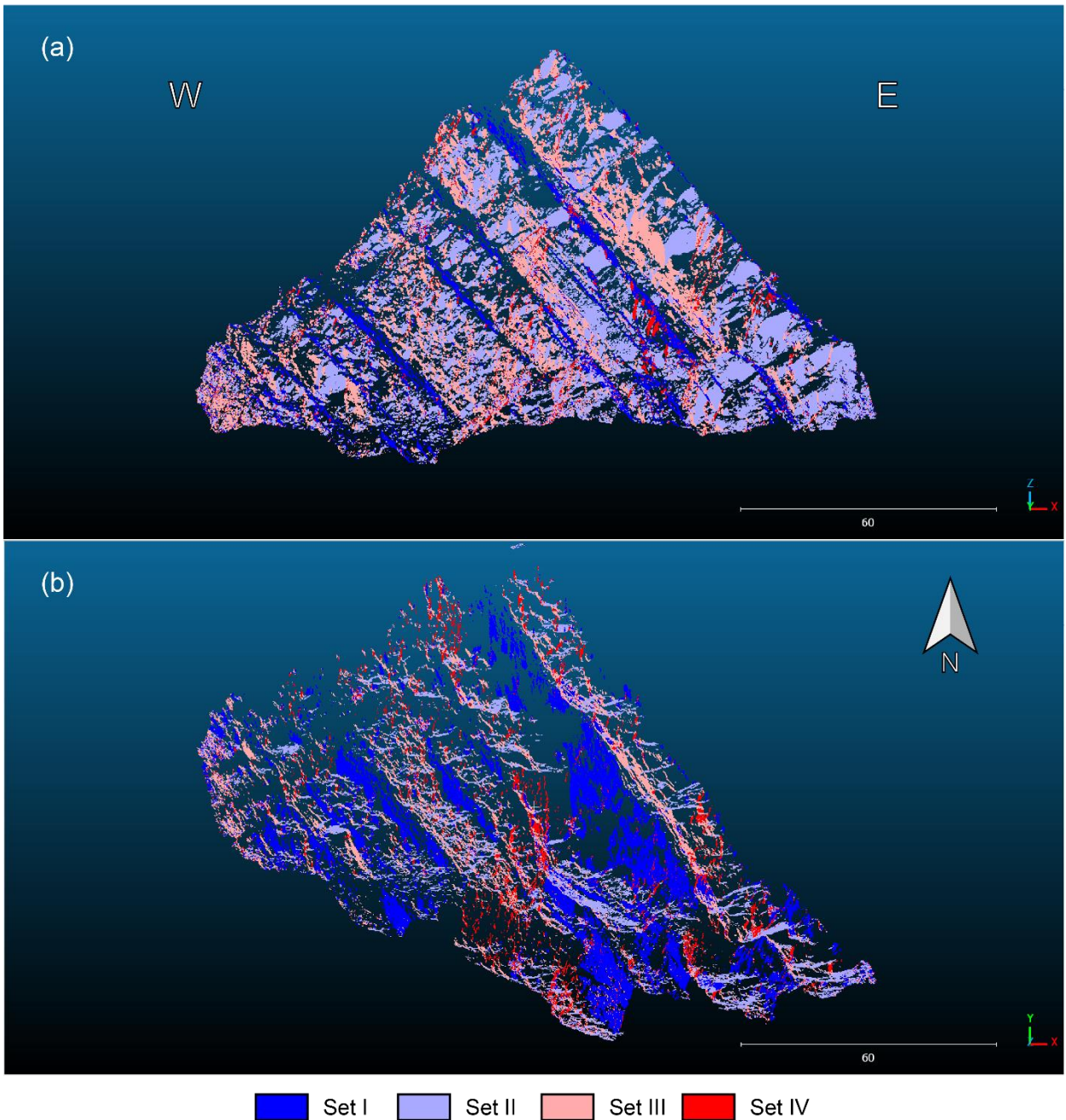


Figura 28: Nube de puntos categorizada según los sets de discontinuidades I, II y III. (a) Vista frontal. (b) Vista en planta.

Las orientaciones de estos sets se utilizaron para realizar el análisis cinemático de la zona de estudio.

4.3.2 Análisis cinemático

Para realizar el análisis cinemático de falla planar, falla en cuña y *toppling* se utilizó el programa *DIPS* (Rocscience, s. f.). El afloramiento estudiado se encuentra en una ladera con $\sim 58^\circ$ de pendiente, que miente hacia el SSW, específicamente con un *Dip Direction* de $\sim 193^\circ$ (Figura 29). La orientación de la ladera fue obtenida a partir del modelo de elevación digital de la zona de estudio, al procesarlo en el software QGIS.

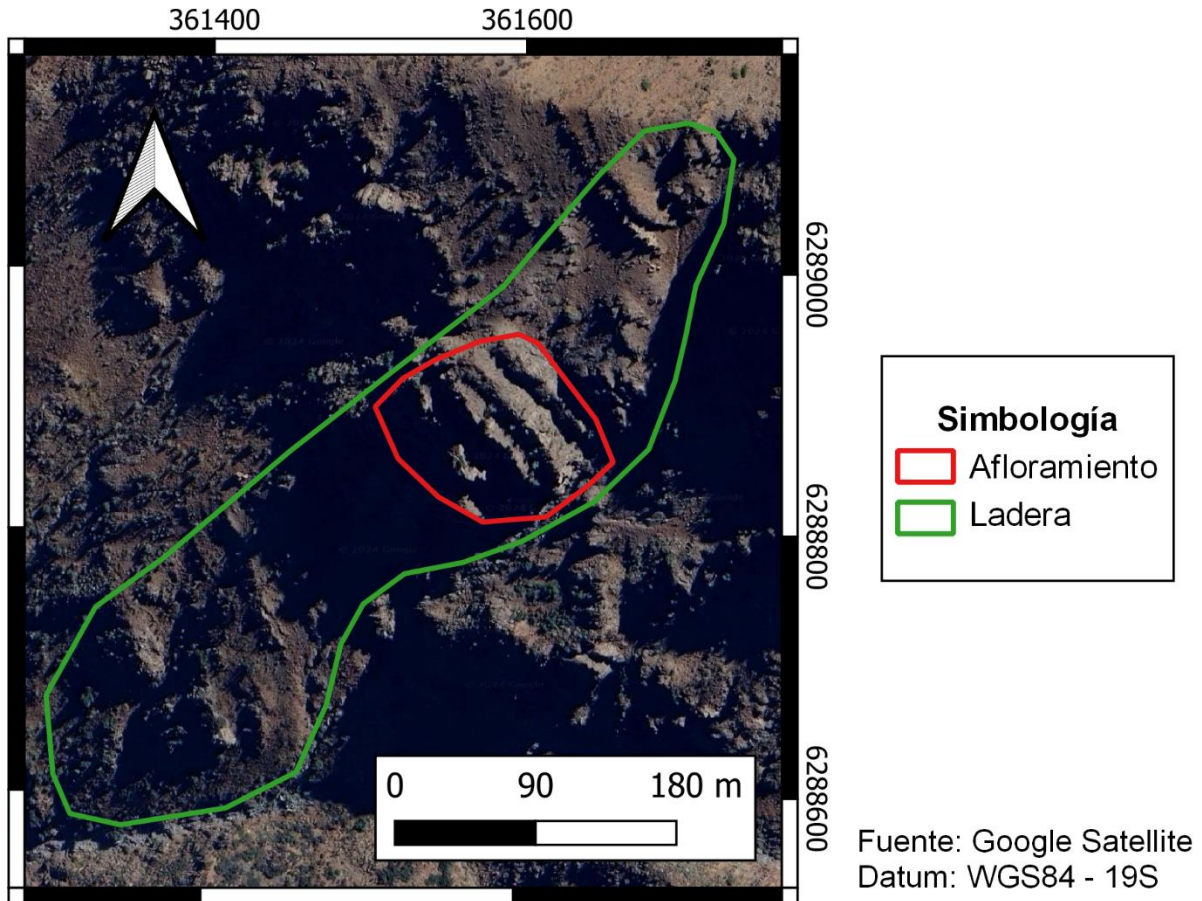


Figura 29: Ladera estudiada en el análisis cinemático

El ángulo de fricción interna de las estructuras (ϕ) se estimó con bibliografía. De acuerdo con los resultados obtenidos por Salinas (2018), las tobas en Chile presentan ángulos de fricción interna entre 36 y 44° , mientras que las areniscas poseen un ángulo de fricción interna de 41° . Por otro lado, considerando posibles rellenos de ceolita, clorita, epidota y pumpellyta, lo ideal sería trabajar con los ángulos de fricción de estos minerales. Sin embargo, solo se encontró información de suelos ceolíticos, que presentan ángulos de fricción interna de 34° - $36,5^\circ$ (Yukselen-Aksoy, 2010). De esta forma, se decidió trabajar con un ϕ de 35° para todas las estructuras.

Con la orientación de la ladera y el ángulo de fricción interna, se realizó el análisis cinemático para falla planar (Figura 30), falla en cuña (Figura 31) y *toppling* (Figura 32).

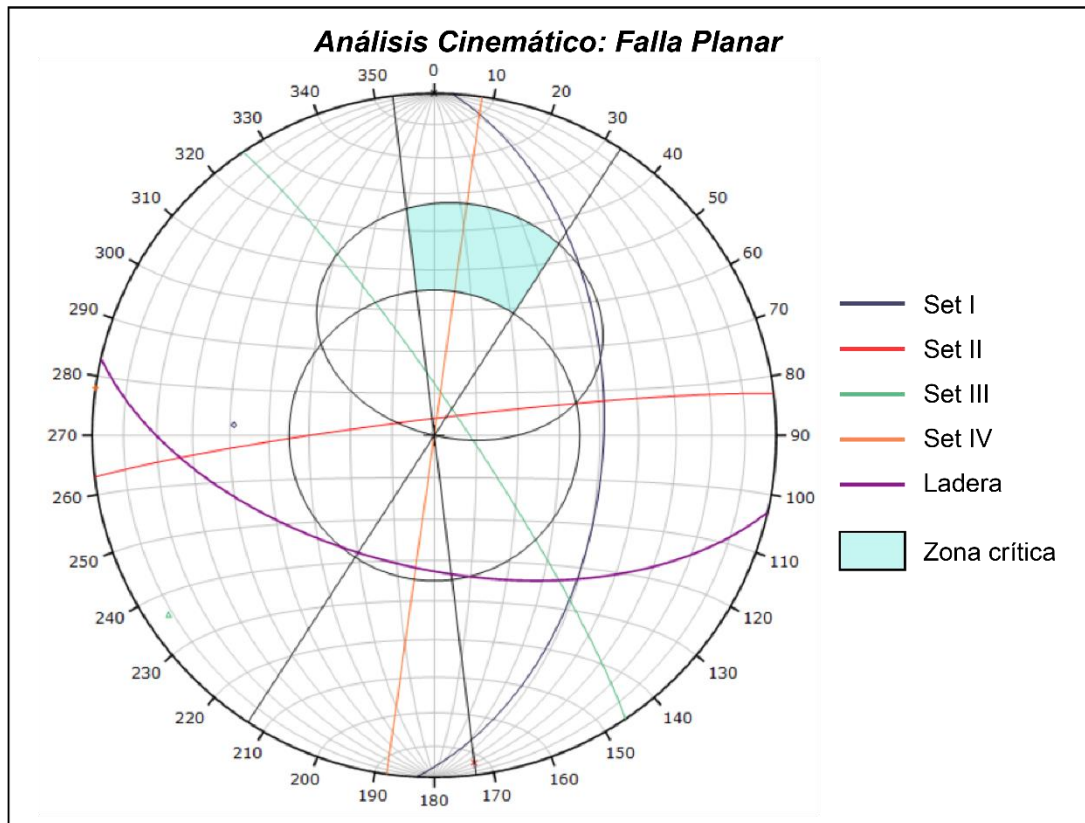


Figura 30: Análisis de falla planar

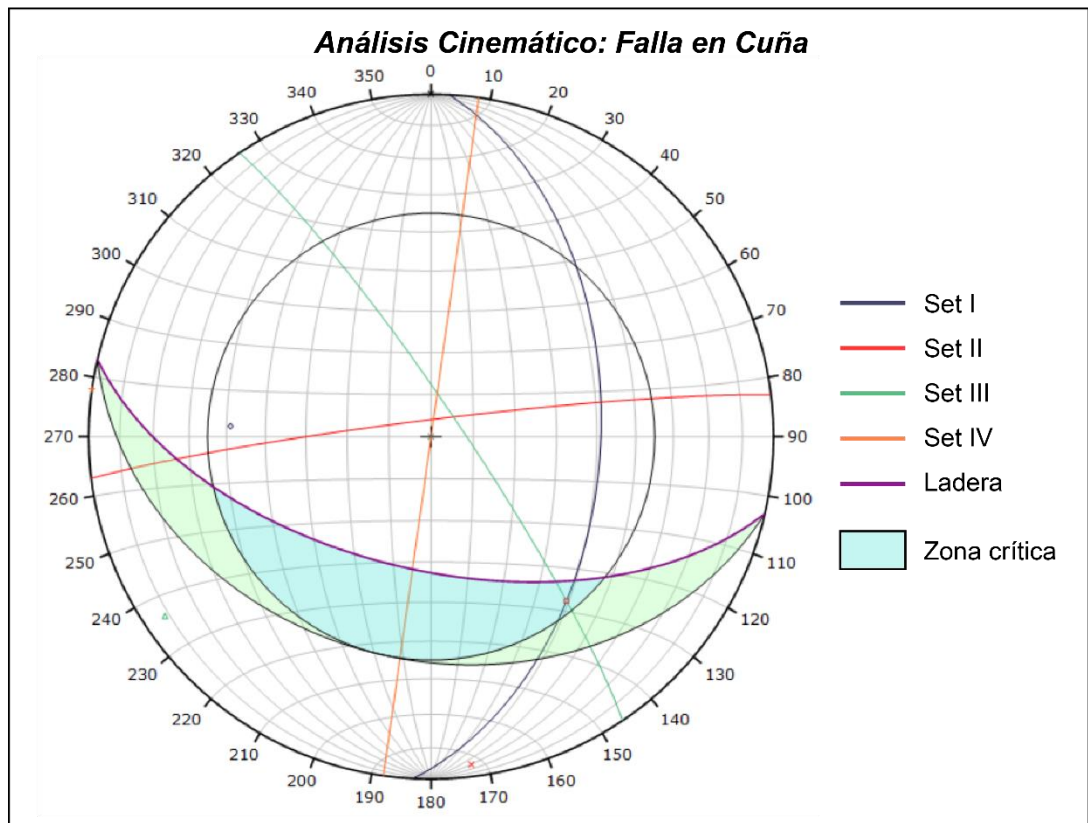


Figura 31: Análisis de falla en cuña

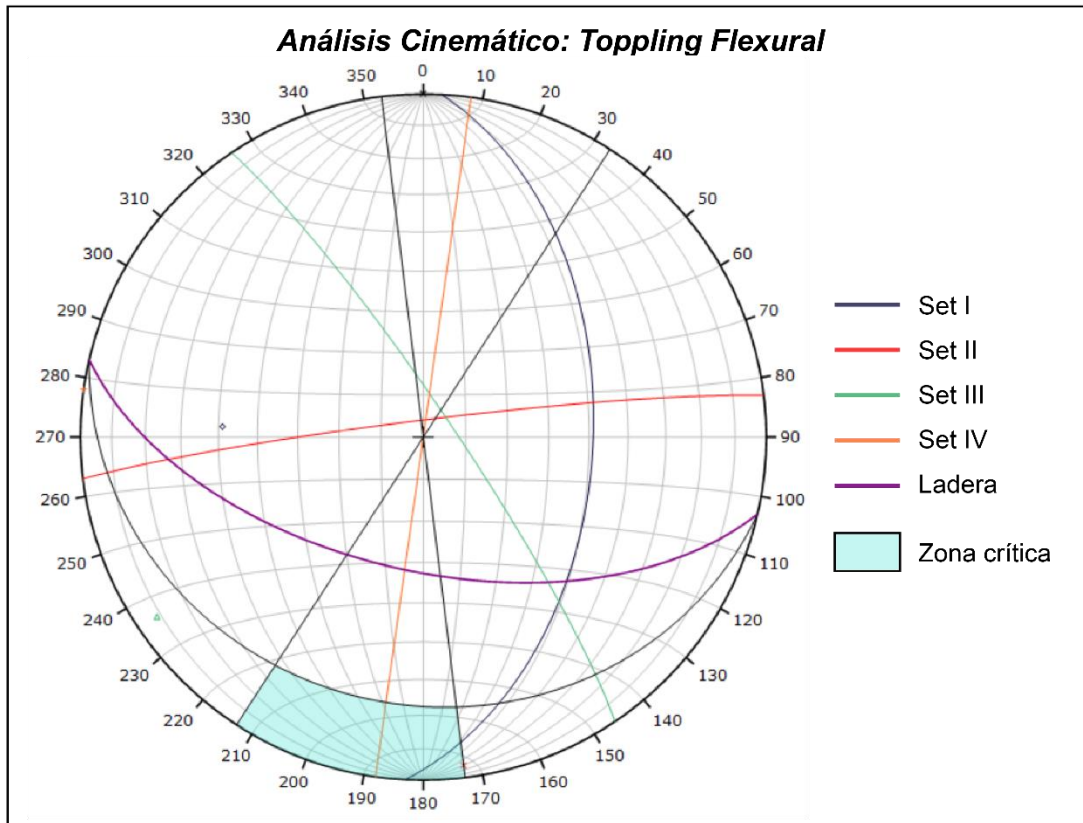


Figura 32: Análisis de toppling

Respecto al análisis cinemático, considerando los resultados, no existen sets que puedan generar falla planar. Los sets I y III podrían generar falla en cuña, debido a que la intersección entre ellos cae dentro de la zona crítica. Por último, el set II podría generar *toppling* pues el polo cae en el borde de la zona crítica. Sin embargo, es necesario realizar un análisis de equilibrio de fuerzas para determinar la estabilidad en ambos casos. Debido a la presencia de bloques caídos en el afloramiento, es probable que existan zonas inestables.

4.4 CUARTA ETAPA

4.4.1 Ficha de levantamiento de datos geotécnicos

Los datos necesarios para realizar la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital se resumen en las fichas de levantamiento de datos geotécnicos de cada sector (ANEXO B). Los parámetros que no pudieron ser determinados mediante la fotogrametría (apertura, rugosidad y relleno) fueron estimados posteriormente con bibliografía. Además, el RQD y la condición de las discontinuidades también se determinaron a partir de la relación con el GSI.

A continuación se detalla el proceso de clasificación del macizo rocoso según RMR (apartado 4.4.2) y GSI (apartado 4.4.3).

4.4.2 Cálculo de RMR

Para el cálculo del RMR se consideraron los sectores definidos anteriormente. Además, se determinaron cuatro RMR distintos:

- RMR₁: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de bibliografía y observaciones, sin considerar presencia de nieve
- RMR₂: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de bibliografía y observaciones, considerando presencia de nieve
- RMR₃: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de relación con GSI, sin considerar presencia de nieve
- RMR₄: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de relación con GSI, considerando presencia de nieve

A continuación, se detalla el proceso de obtención de cada uno de los parámetros necesarios para calcular el RMR.

4.4.2.1 Resistencia de la matriz rocosa

Luego de un análisis visual de la nube de puntos 3D se determinó que en el afloramiento probablemente hay tobas y areniscas. Si bien, existen distintos rangos de resistencia para ambas litologías, se decidió trabajar con los valores obtenidos por Salinas (2018), que estudió las propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile.

La resistencia a la compresión simple de las tobas sería de *26-52 MPa* y la de las areniscas sería de *33-58 MPa*. Ambos valores se consideran en el rango de 25-50 MPa, asignándole *4 puntos* al RMR, en todos los sectores.

4.4.2.2 RQD

Respecto al RQD, este no fue calculado directamente debido a la escala de trabajo. Las fotografías utilizadas y la nube de puntos 3D no son lo suficientemente detalladas para poder calcular este parámetro.

Por esto, se utilizó la relación propuesta por Hoek et al. (2013) a partir del GSI (calculado en el apartado 4.4.3), obteniendo los siguientes resultados:

- Sector 1: RQD de 60-80%
- Sector 2: RQD de 52-72%
- Sector 3: RQD de 40-60%

Los sectores 1 y 2 quedan mayormente dentro del rango 50-75%. Si bien, el sector 1 llega hasta 80%, es preferible no sobreestimar la clasificación. El sector 3 queda entre los rangos 25-50% y 50-75%, por ende, para no sobreestimar la puntuación, se decidió dejarlo en el rango 25-50%. Así, el puntaje asociado al RQD será de *13 puntos para los sectores 1 y 2*, y de *8 puntos para el sector 3*.

4.4.2.3 Espaciamiento entre las discontinuidades

El espaciamiento entre las discontinuidades fue calculado a partir de la frecuencia de discontinuidades, observando directamente la nube de puntos 3D en *CloudCompare*. Se definieron diferentes líneas de detalle y se evaluaron los resultados para cada sector (Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13). En la Figura 33 se muestran las líneas utilizadas para medir el espaciamiento.

Tabla 11: Espaciamiento en sector 1

SECTOR 1	
Línea	Espaciamiento [m]
1.1	1,5
1.2	1,6
1.3	1,5

Tabla 12: Espaciamiento en sector 2

SECTOR 2	
Línea	Espaciamiento [m]
2.1	0,5
2.2	1,3
2.3	0,5
2.4	0,5

Tabla 13: Espaciamiento en sector 3

SECTOR 3	
Línea	Espaciamiento [m]
3.1	0,7
3.2	0,5
3.3	0,6

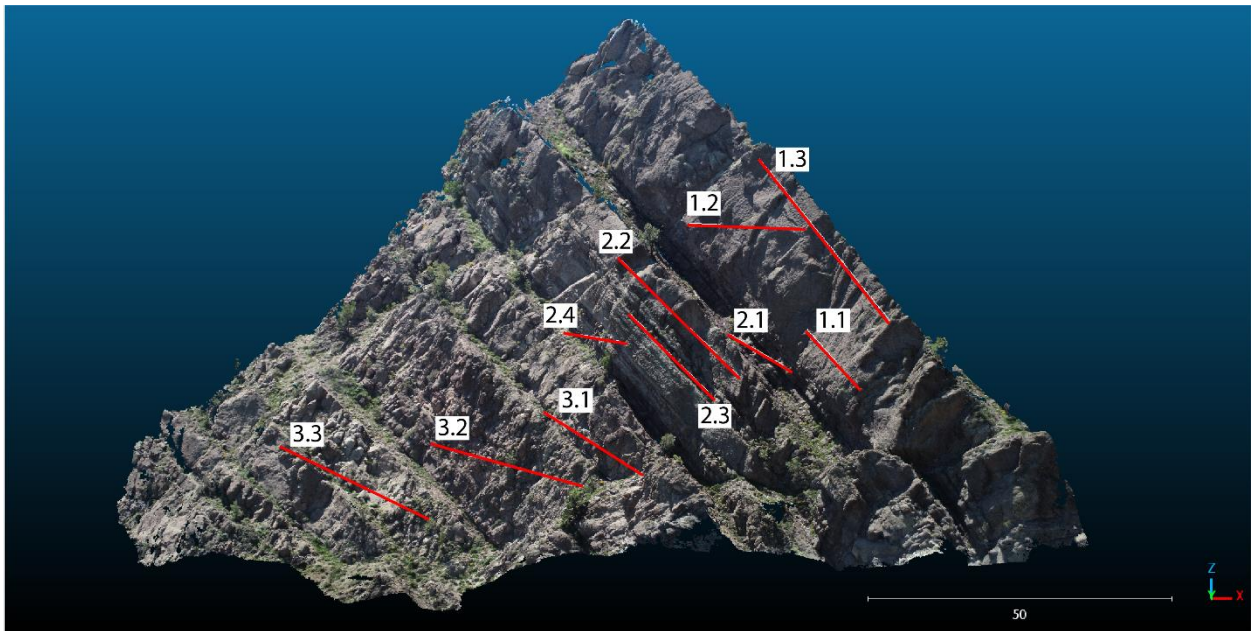


Figura 33: Líneas de detalle utilizadas para calcular el espaciamiento

En la Figura 34 se muestra un ejemplo del conteo de discontinuidades en una de las líneas de detalle.



Figura 34: Ejemplo de identificación de discontinuidades en una línea de detalle

En el sector 1 el espaciamiento de las discontinuidades queda en el rango 0,6-2 m, que le otorga un puntaje de *15 puntos*.

En el sector 2 el espaciamiento en las tobas es mayor que en las areniscas. Sin embargo, para no sobreestimar el puntaje, se decidió dejarlo en el rango 200-600 mm. Así, en este sector el puntaje asociado al espaciamiento será de *10 puntos*.

En el sector 3, se decidió dejar el espaciamiento en el rango 200-600 mm ya que hay una gran parte del sector que podría tener este espaciamiento. Si bien, para los estratos de toba grisácea, el espaciamiento es un poco mayor, se encuentra cercano al límite de los 0,6 m, por eso se prefirió el intervalo de 200-600 mm. De esta forma, se le entrega un puntaje de *10 puntos* respecto al espaciamiento.

En general, se recomienda elegir el espaciamiento que no provoque una sobreestimación de este parámetro y que sea lo suficientemente representativo, por eso, para los sectores 2 y 3 se eligieron los rangos de 200-600 mm a pesar de que en algunas líneas de detalle los espaciamientos obtenidos se salían de este rango. De todas formas, esto queda a criterio del personal a cargo del estudio.

Es importante destacar que la medición del espaciamiento en *CloudCompare* pudo verse afectada por la resolución de la nube de puntos, especialmente en zonas más fracturadas como las líneas de detalle 2.1, 2.3, 3.1, 3.2 y 3.3, donde el espaciamiento podría ser menor al medido.

4.4.2.4 Condición de las discontinuidades

Para la condición de las discontinuidades hay que determinar largo, apertura, rugosidad, relleno y meteorización.

El largo fue medido directamente en *CloudCompare*. En todos los sectores las discontinuidades del set I (asociado a los planos de estratificación) son continuas y llegan a medir más de 20 m. Las discontinuidades del set II en su mayoría atraviesan de un sector a otro, llegando a medir más de 20 m, pero son menos continuas que las del set I. Respecto a los sets III y IV, estas son menos continuas que los otros sets y llegan a medir hasta 20 m. Solo en el sector 2 existen discontinuidades de menos de 1 m de largo, en los estratos de arenisca. En resumen, la mayoría de las discontinuidades son bastante continuas y de gran largo, por lo que se le asigna un puntaje de *0 puntos*.

La meteorización se determinó observando las fotografías y la nube de puntos. En general las superficies parecieran levemente meteorizadas en los sectores 1 y 2. En el sector 3, parecieran estar moderadamente meteorizadas, pues las tobas se ven más rojizas que en los otros sectores. Teniendo en cuenta lo anterior, se les asignaron *5 puntos a los sectores 1 y 2, y 3 puntos al sector 3*.

La apertura, rugosidad y relleno no pueden ser determinadas solo con fotogrametría en esta escala de trabajo. Sin embargo, se redujeron los rangos de los puntajes asociados a cada parámetro utilizando datos bibliográficos. En relación a la apertura, Sepúlveda (1998) menciona que las discontinuidades se encuentran en su mayoría abiertas. De esta manera, se decidió dejar el puntaje asociado a la apertura en un rango de *0 a 4 puntos*, equivalente a una apertura de >5 mm a $<0,1$ mm.

En cuanto a la rugosidad, no se cuenta con información bibliográfica, pero en las fotografías y la nube de puntos 3D se observa que las superficies podrían tener cierto grado de rugosidad. Además, en un inicio DSE entregó un set de discontinuidades que aparecía principalmente en planos del del set I, lo que podría indicar que estas tendrían cierto grado de rugosidad. Cabe destacar, que en el sector 3 las superficies se observan más lisas en comparación a los otros sectores. Considerando lo anterior, se decidió clasificar las discontinuidades como rugosas a levemente rugosas en los sectores 1 y 2, y levemente rugosas a suaves en el sector 3, asignándole de *3 a 5 puntos a los sectores 1 y 2, y de 1 a 3 puntos al sector 3*.

Respecto al relleno, Sepúlveda (1998) menciona que las discontinuidades de las rocas estratificadas *no tienen relleno*. Sin embargo, Thiele (1980) destaca que todas las rocas de la Fm. Abanico se encuentran medianamente alteradas, con *ceolitización* y *cloritización* en distintos grados. Por su parte, Villarroel & Vergara (1988), mencionan que los estratos que mantean hacia el este estarían alterados principalmente con *epidota*, *clorita* y *pumpellyta*. De esta forma, se decidió dejar el puntaje del relleno en un rango de *2 a 6 puntos* para los tres sectores, equivalente a relleno blando <2 mm o duro >2 mm, hasta sin relleno.

Por otro lado, el puntaje asociado a la condición de las discontinuidades dado por la relación con el GSI (calculado en el apartado 4.4.3) sería de *18 a 24 puntos* para el sector 1, *16 a 22 puntos* para el sector 2, y *10 a 16 puntos* para el sector 3.

4.4.2.5 Agua

Respecto a las condiciones generales de agua, en las fotografías el afloramiento pareciera estar completamente seco. Esto le otorga un puntaje de *15 puntos* al cálculo del RMR sin considerar la presencia de nieve.

Por otro lado, al observar imágenes de otras épocas de la zona de estudio, se evidencia presencia de nieve estacional, principalmente en los meses de invierno. Por esto, se le asigna un puntaje de *4 puntos* para el cálculo del RMR, considerando la presencia de nieve.

4.4.2.6 Resumen de los resultados

A continuación se presenta el resumen de los puntajes asignados para el cálculo del RMR en cada sector del afloramiento estudiado (Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16). Los RMR calculados corresponden a:

- RMR₁: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de bibliografía y observaciones, sin considerar presencia de nieve
- RMR₂: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de bibliografía y observaciones, considerando presencia de nieve
- RMR₃: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de relación con GSI, sin considerar presencia de nieve
- RMR₄: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de relación con GSI, considerando presencia de nieve

Tabla 14: Resumen de puntajes RMR para el sector 1.

SECTOR 1					
Parámetro	RMR ₁	RMR ₂	RMR ₃	RMR ₄	
Resistencia de la matriz rocosa	4	4	4	4	
RQD	13	13	13	13	
Espaciamiento	15	15	15	15	
Condición de las discontinuidades	Largo	0	0	18 a 24	18 a 24
	Apertura	0 a 4	0 a 4		
	Rugosidad	3 a 5	3 a 5		
	Relleno	2 a 6	2 a 6		
	Meteorización	5	5		
	Suma total	10 a 20	10 a 20		
Agua	15	4	15	4	
Total RMR	Mínimo	57	46	65	54
	Máximo	67	56	71	60
	Intermedio	62	51	68	57

Tabla 15: Resumen de puntajes RMR para el sector 2

SECTOR 2					
Parámetro	RMR ₁	RMR ₂	RMR ₃	RMR ₄	
Resistencia de la matriz rocosa	4	4	4	4	
RQD	N.A.	N.A.	13	13	
Espaciamiento	10	10	10	10	
Condición de las discontinuidades	Largo	0	0	16 a 22	16 a 22
	Apertura	0 a 4	0 a 4		
	Rugosidad	3 a 5	3 a 5		
	Relleno	2 a 6	2 a 6		
	Meteorización	5	5		
	Suma total	10 a 20	10 a 20		
Agua	15	4	15	4	
Total RMR	Mínimo	52	41	58	47
	Máximo	62	51	64	53
	Intermedio	57	46	61	50

Tabla 16: Resumen de puntajes RMR para el sector 3

SECTOR 3					
Parámetro	RMR ₁	RMR ₂	RMR ₃	RMR ₄	
Resistencia de la matriz rocosa	4	4	4	4	
RQD	N.A.	N.A.	8	8	
Espaciamiento	10	10	10	10	
Condición de las discontinuidades	Largo	0	0	10 a 16	10 a 16
	Apertura	0 a 4	0 a 4		
	Rugosidad	1 a 3	1 a 3		
	Relleno	2 a 6	2 a 6		
	Meteorización	3	3		
	Suma total	6 a 16	6 a 16		
Agua	15	4	15	4	
Total RMR	Mínimo	43	32	47	36
	Máximo	53	42	53	42
	Intermedio	48	37	50	39

Para clasificar el macizo rocoso se tomó en cuenta la relación propuesta en la construcción de la metodología (Ecuación 6, Ecuación 7 y Ecuación 8).

En la Tabla 17 se muestra la clasificación del macizo rocoso para cada sector, según los distintos RMR calculados.

Tabla 17: Clasificaciones según RMRs obtenidos

SECTOR 1			SECTOR 2			SECTOR 3		
RMR ₁	62 ± 5	Clase II-III	RMR ₁	57 ± 5	Clase II-III	RMR ₁	48 ± 5	Clase III
RMR ₂	51 ± 5	Clase III	RMR ₂	46 ± 5	Clase III	RMR ₂	37 ± 5	Clase III-IV
RMR ₃	68 ± 3	Clase II	RMR ₃	61 ± 3	Clase II-III	RMR ₃	50 ± 3	Clase III
RMR ₄	57 ± 3	Clase III	RMR ₄	50 ± 3	Clase III	RMR ₄	39 ± 3	Clase III-IV

4.4.3 Cálculo de GSI

Para calcular el GSI, se debe analizar las estructuras y la condición de las superficies. En este caso, se trabajó con la tabla de GSI de Hoek et al. (2013), donde se relaciona el GSI con el RQD y la condición de las discontinuidades, con el fin de poder obtener una estimación de estos parámetros para el cálculo del RMR.

Respecto a las estructuras, en los sectores 1, 2 y 3 hay tres sets de diaclasas y un set de estratificación. Sin embargo, se debe destacar que el grado de fracturamiento aumenta hacia la base del afloramiento, es decir, el sector 1 es el menos fracturado y el sector 3 el más fracturado. Los sectores 1 y 2 presentan bloques cúbicos, los cuales son de menor tamaño en el sector 2, especialmente en los estratos finos de areniscas. En el sector 3 los bloques son más angulosos y de menor tamaño. De esta forma, el sector 1 fue clasificado como “blocoso”, el sector 2 como “blocoso” a “muy blocoso”, y el sector 3 como “muy blocoso”.

En relación a la condición de las superficies, en general, las discontinuidades son leve a moderadamente sinuosas. En el sector 1 estas parecieran ser rugosas y se encuentran levemente meteorizadas. En el sector 2, también parecieran ser rugosas y se encuentran levemente meteorizadas, pero se observa mayor erosión en comparación al sector 1. En el sector 3, las superficies se ven más lisas y más meteorizadas. De este modo, en los sectores 1 y 2 se clasificó la condición de la superficies como “buena” y en el sector 3 como “regular”.

En consecuencia, se obtuvo un *GSI de 62-72 para el sector 1, 55-65 para el sector 2 y 40-50 para el sector 3* (Figura 35).

Finalmente, a partir de los GSI obtenidos, se estimó el RQD y el puntaje asociado a la condición de las discontinuidades (JCond89), obteniendo los siguientes resultados:

- Sector 1: RQD de 60-80%; JCond89 entre 18 y 24 puntos aproximadamente
- Sector 2: RQD de 52-72%; JCond89 entre 16 y 22 puntos aproximadamente
- Sector 3: RQD de 40-60%; JCond89 entre 10 y 16 puntos aproximadamente

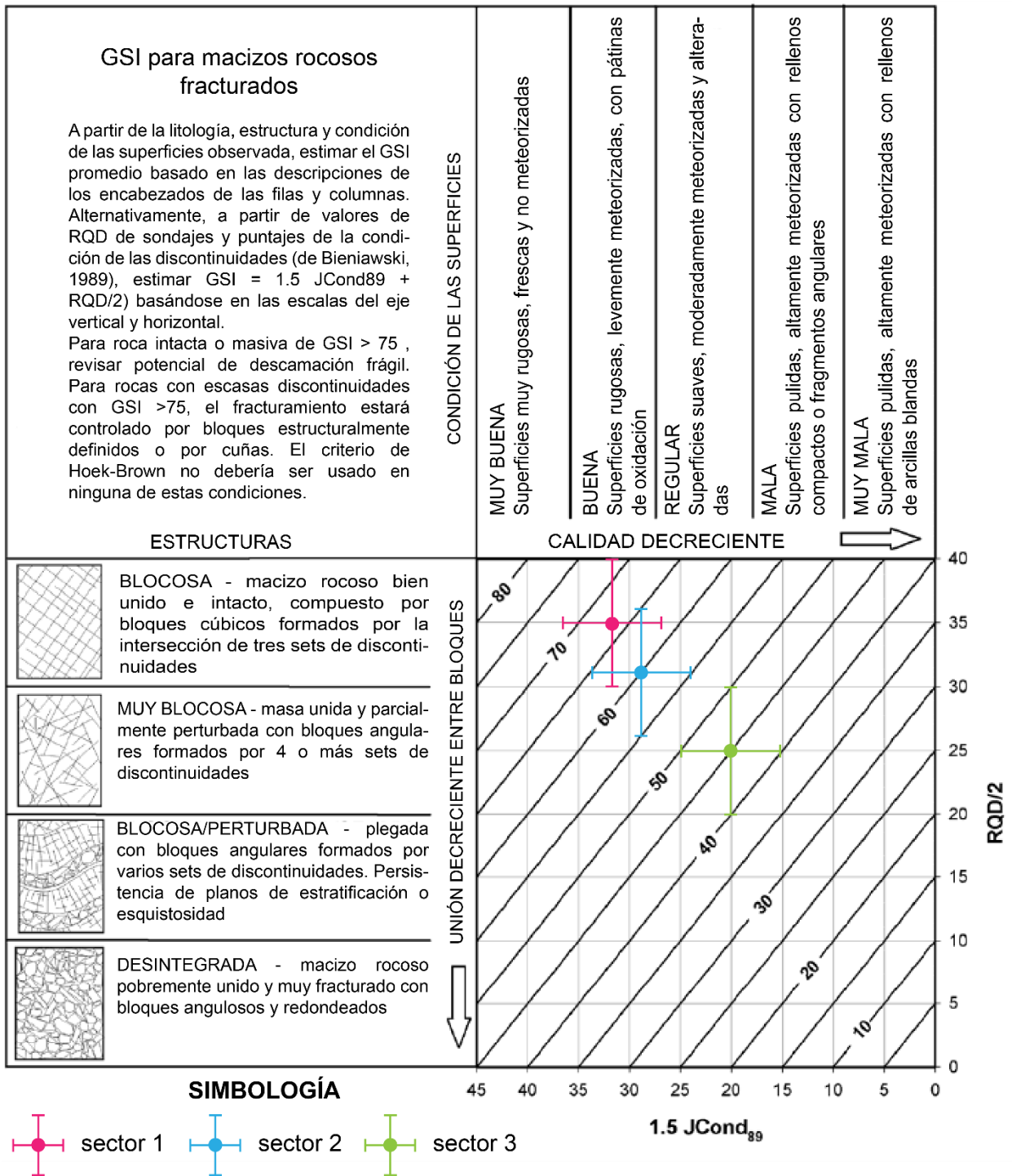


Figura 35: Resultados del cálculo del GSI para los tres sectores. Los puntos representan el punto medio de los rangos utilizados para cada sector

5 DISCUSIONES Y ANÁLISIS

En este trabajo se elaboró una metodología para la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital, la cual se aplicó en un afloramiento de la quebrada Lo Cañas, ubicada en la comuna de La Florida, Región Metropolitana. A continuación, se presentan las discusiones y análisis de la metodología elaborada y de los resultados obtenidos en su aplicación.

5.1 SOBRE LA METODOLOGÍA

La metodología propuesta tiene un enfoque principalmente cualitativo para la caracterización geotécnica de macizos rocosos y sus alcances dependerán directamente de la escala de trabajo.

Se debe destacar que la fotogrametría digital ha sido utilizada en trabajos anteriores solo como complemento de los datos obtenidos en terreno y no como una forma exclusiva de clasificación. Por esto mismo, la metodología propuesta considera las limitaciones y alcances del uso de la fotogrametría digital para la clasificación de macizo rocoso mediante los distintos sistemas de clasificación.

La metodología se compone de cuatro etapas principales y cada una de ellas será fundamental para tener buenos resultados. En la primera etapa, la recopilación bibliográfica es crucial para complementar los datos que no puedan ser obtenidos directamente del análisis de la nube de puntos o de las fotografías, especialmente la apertura, rugosidad y relleno de las discontinuidades.

Respecto a la segunda etapa, se recomienda el uso de fotografías de alta resolución que sean tomadas a una corta distancia del afloramiento sin comprometer la seguridad del dron, pues así se generará una nube de puntos más detallada. Por otro lado, en esta etapa es crucial la descripción del macizo rocoso a partir de las fotografías y de la nube de puntos 3D, para una correcta identificación de la/s litología/s presentes, lo cual influirá directamente en la resistencia para el cálculo del RMR.

En la tercera etapa, es esencial realizar un correcto filtrado de los sets de discontinuidades entregados por *Discontinuity Set Extractor*, pues el programa clasifica la mayoría de los puntos de la nube de puntos 3D pudiendo entregar falsas familias de discontinuidades. A su vez, una correcta identificación de los sets permitirá un análisis cinemático más preciso y acertado.

En relación a la cuarta etapa, lo más importante es realizar un buen levantamiento de datos geotécnicos antes de clasificar el macizo rocoso, siguiendo la ficha de levantamiento de datos presentada en este trabajo.

Respecto al RMR, el espaciamiento de las discontinuidades puede verse afectado por la resolución de las fotografías, pudiendo ser en realidad menor al estimado con

fotogrametría, debido a la pérdida de exactitud de las mediciones en *CloudCompare* a medida que la resolución de la nube de puntos disminuye, especialmente en zonas altamente fracturadas.

El largo y la meteorización de las discontinuidades podrán ser estimados sin mayores problemas a partir de la nube de puntos 3D. Sin embargo, la apertura, rugosidad y relleno de las discontinuidades no podrán ser determinados con certeza, por ende se propuso una estimación del RMR dentro de un rango de variación. El valor de este rango de variación dependerá principalmente de la información bibliográfica existente, donde a mayor calidad de la información bibliográfica, menor será el rango de variación del RMR. Sin embargo, es difícil encontrar información detallada sobre la apertura, la rugosidad y el relleno de las discontinuidades a no ser que el macizo rocoso se ubique en una zona que ya haya sido estudiada en detalle, lo cual probablemente no suceda para la mayoría de los casos.

Es importante destacar que la máxima resolución que podría alcanzarse, con buenos equipos, se encuentra cercana a 1 cm por pixel. Por lo tanto, la distancia mínima a medir bajo estas condiciones sería de 2 a 4 cm, descartando la posibilidad de estimar la apertura y el relleno, que son parámetros estimados en ordenes milimétricos. Considerando lo anterior, se debería determinar si la rugosidad puede ser estimada con la metodología desarrollada en este trabajo, pues ya ha sido determinada con resolución milimétrica, pero no centimétrica

La resistencia de la matriz rocosa dependerá netamente de disponibilidad de datos bibliográficos y de la descripción geológica realizada a partir de las fotografías, por eso será crucial llevar a cabo de manera óptima estas etapas de la metodología, y así poder evitar errores en el proceso. Es importante destacar que al ser una aproximación bibliográfica, no necesariamente se tendrán datos específicos de la zona de estudio y podrían ser datos de zonas “cercanas”, por ende se deben utilizar con precaución intentando no sobreestimar la calidad del macizo rocoso.

Las condiciones generales de agua se podrán determinar a partir de la observación directa de las fotografías y la nube de puntos, sin mayores dificultades. Igualmente, se debe tener cuidado con los valores utilizados.

Por su parte, el GSI presenta limitaciones en relación a la condición de las superficies, especialmente respecto a la rugosidad, la cual podrá ser determinada con mayor certeza solo si se trabaja a una escala extremadamente detallada. De todas formas, se propone que el GSI sea determinado en intervalos de 10 unidades, pudiendo hacer una estimación bastante acertada. Al igual que el RMR, este rango de variación podría reducirse con mejor resolución de la nube de puntos y mayor información bibliográfica.

En general, todos los parámetros del RMR y del GSI dependen de la resolución de las fotografías y de la nube de puntos. Se debe tener en cuenta que una mayor resolución de la nube de puntos entregará resultados más exactos, pero se ralentizará su

procesamiento e incluso el computador utilizado podría ser incapaz de procesar la nube de puntos en DSE y *CloudCompare*.

Aunque la metodología propuesta sigue, a grandes rasgos, pasos similares a los métodos tradicionales, la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital presenta varias ventajas sobre los métodos convencionales:

- *Mayor seguridad*: No hay necesidad de acercarse por completo al macizo rocoso. Esto no solo elimina los problemas de acceso, sino que también reduce el riesgo de accidentes para el personal a cargo del estudio, protegiendo su integridad, en especial en áreas inestables o peligrosas.
- *Análisis de áreas inaccesibles y mayor cantidad de datos estructurales*: Permite observar y analizar sectores de la zona de estudio que no podrían ser analizados directamente en terreno. Esto es especialmente importante para la toma de datos estructurales, pues en general, obtención de datos *in situ* se limita a la base del macizo rocoso, pudiendo ser imposible alcanzar zonas más elevadas. De esta forma, se obtendrá mayor cantidad de datos estructurales pues se puede estudiar el macizo rocoso completo con DSE y no solo su base.
- *Representación tridimensional*: La generación de una nube de puntos 3D permite una visualización del macizo rocoso desde distintos ángulos, facilitando su estudio desde varias perspectivas al mismo tiempo. A su vez, proporciona una mejor vista global del macizo rocoso y un mejor entendimiento de su estructura.
- *Análisis estructural preciso y completo*: El uso de *Discontinuity Set Extractor* permite un análisis estructural de alta precisión y de forma mucho más rápida que la metodología tradicional de toma de datos con brújula. Además, la obtención de una nube de puntos clasificada según familias de discontinuidades proporciona una visualización gráfica de los sets, facilitando el entendimiento de las estructuras del macizo rocoso.
- *Gran alcance*: La metodología tiene una amplia cobertura, pudiendo abarcar grandes áreas en menos tiempo que el método tradicional. Esto es especialmente útil para proyectos de gran envergadura.
- *Monitoreo del macizo rocoso*: La nube de puntos 3D generada puede ser guardada y comparada con nuevas nubes de puntos, permitiendo un monitoreo continuo del macizo rocoso a lo largo del tiempo. Esto podría ser beneficioso para estudios de peligros en la zona estudiada.
- *Costos*: En casos de inaccesibilidad, se requerirá de equipos mucho más costosos (como un helicóptero) para acceder a la zona de estudio, siendo el uso de drones la opción más económica. Incluso sin problemas de acceso, levantar una gran cantidad de datos tomaría más horas de trabajo en terreno, lo que implica un mayor costo de personal, y aun así la cantidad de datos no sería comparable con los obtenidos con DSE.

Esta metodología también presenta desventajas en comparación a los métodos tradicionales de clasificación:

- *Resolución:* La resolución máxima de las imágenes de dron no permite la obtención de la apertura y el relleno de las discontinuidades. Además, para obtener con mayor certeza la rugosidad de las discontinuidades y el RQD se requiere de equipos que sean capaces de obtener resoluciones centimétricas.
- *Menor precisión:* Respecto al RMR, no se puede obtener la apertura ni el relleno de las discontinuidades. Para el RMR y GSI la rugosidad solo se podría obtener si la escala de trabajo es centimétrica. Esto implica que la clasificación de macizo rocoso utilizando fotogrametría será menos precisa que la clasificación con métodos convencionales donde sí se obtengan estos parámetros. Sin embargo, los resultados del uso de la fotogrametría igualmente son acertados.

5.2 SOBRE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología propuesta fue aplicada en un afloramiento de la quebrada Lo Cañas. Se logró construir una nube de puntos 3D a partir de las 42 fotografías de afloramiento, la cual fue utilizada para la clasificación de macizo rocoso del afloramiento según RMR y GSI.

El análisis estructural de la nube de puntos con DSE entregó cuatro sets de discontinuidades presentes en el afloramiento. Es importante destacar que los sets son observables desde imágenes satelitales y sus orientaciones tienen sentido con lo observado en dichas imágenes. Esto confirma una vez más que DSE tiene una gran capacidad de identificación de familias de discontinuidades con buena precisión, siempre considerando el criterio experto de filtrado de los sets.

En relación al RMR, se calcularon cuatro escenarios distintos para evaluar cómo variaba la clasificación según la presencia de nieve, y para comparar los resultados aproximando la condición de las discontinuidades (apertura, rugosidad y relleno) a partir de bibliografía, con los resultados al estimar la condición de las discontinuidades a partir del GSI.

En la estimación de los parámetros del RMR se eligió siempre el peor escenario posible, o se determinaron rangos que incluyeran los peores escenarios posibles de acuerdo con la información que se tenía, con el fin de no sobreestimar la calidad del macizo rocoso.

En general, es preferible una clasificación conservadora antes que una clasificación demasiado optimista, que podría traer consecuencias graves. Esto es especialmente importante en este caso de estudio, puesto que hay parámetros que no podían ser determinados debido a la resolución de las imágenes y de la nube de puntos, y la información bibliográfica disponible.

El afloramiento se dividió en tres sectores que fueron clasificados de forma separada, obteniendo diferentes calidades de macizo rocoso. Respecto a los resultados del RMR,

el sector 1 fue clasificado como un macizo rocoso de calidad buena a regular sin considerar la presencia de nieve, y de calidad regular al considerarla. El sector 2 fue clasificado como un macizo rocoso de calidad buena a regular sin considerar la presencia de nieve, y de calidad regular a mala al considerarla. Por último, el sector 3 fue clasificado como un macizo rocoso de calidad regular sin considerar la presencia de nieve, y de calidad regular a mala al considerarla.

En la Figura 36 se muestra una comparación visual de los resultados por sector. Recordando que:

- RMR₁: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de bibliografía y observaciones, sin considerar presencia de nieve
- RMR₂: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de bibliografía y observaciones, considerando presencia de nieve
- RMR₃: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de relación con GSI, sin considerar presencia de nieve
- RMR₄: RMR estimando la condición de las discontinuidades a partir de relación con GSI, considerando presencia de nieve

Como era de esperarse, la presencia de nieve disminuye la calidad geotécnica.

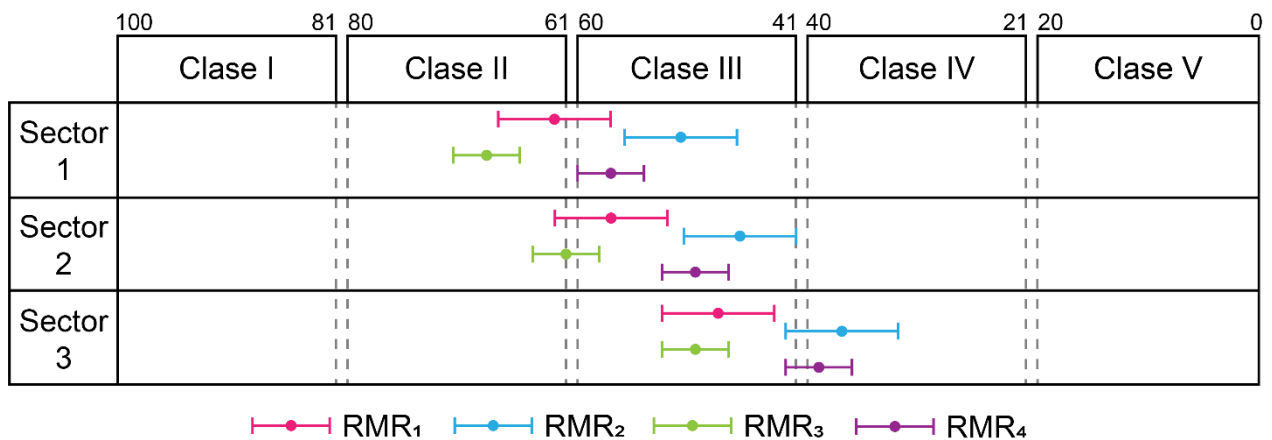


Figura 36: Comparación de los resultados del RMR para cada sector

Por otro lado, al comparar los puntajes obtenidos para una misma condición de agua, es decir, RMR₁ con RMR₃ (sin presencia de nieve) y RMR₂ con RMR₄ (con presencia de nieve), se observa que las clasificaciones son bastante similares, esto puede verse en el Gráfico 1 y Gráfico 2.

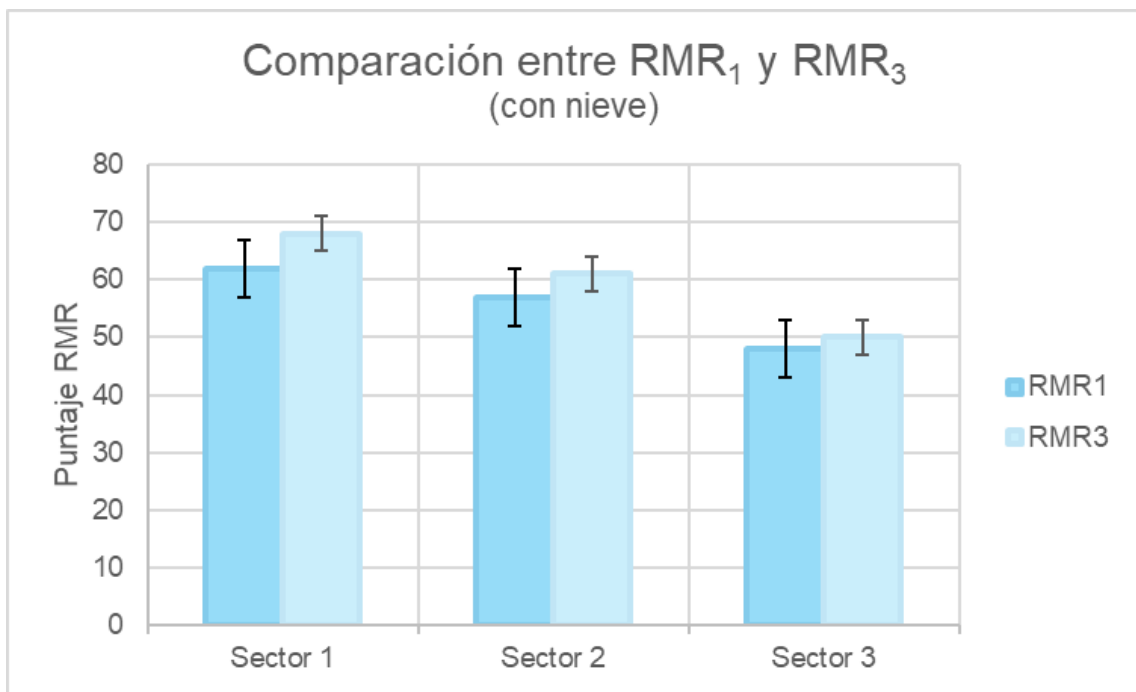


Gráfico 1: Comparación de puntajes RMR_1 y RMR_3

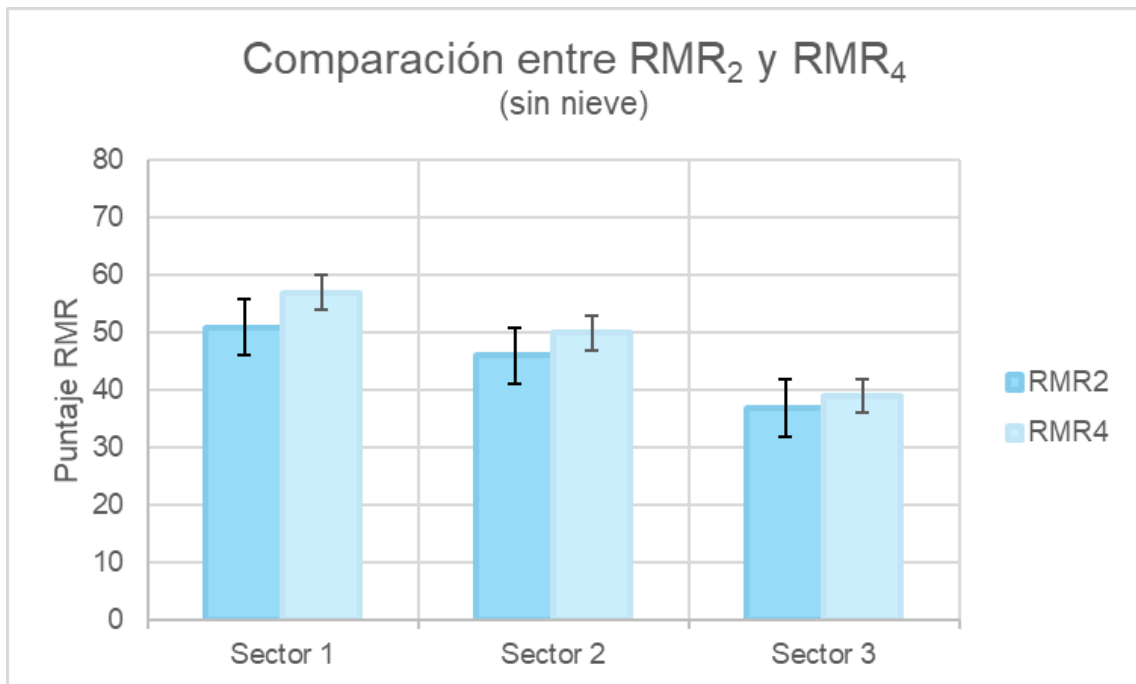


Gráfico 2: Comparación de puntajes RMR_2 y RMR_4

En los sectores 1 y 2, los puntajes calculados estimando la condición de las discontinuidades (apertura, rugosidad y relleno) a partir de observaciones y bibliografía (RMR_1 y RMR_2) son levemente menores a los que consideran la condición de las discontinuidades a partir del GSI. En el sector 3, los RMR_3 y RMR_4 quedan incluidos dentro del rango de variación de RMR_1 y RMR_2 respectivamente, con $RMR_{intermedios}$ muy similares entre sí.

Se podría decir que RMR_1 y RMR_2 tienden a ser más conservadores, pues se corren menos riesgos al tener un rango de variación más amplio, que considera escenarios donde la calidad del macizo rocoso podría ser peor. Por su parte, RMR_3 y RMR_4 siguen siendo una buena aproximación al fin y al cabo.

Se debe destacar que los puntajes totales asociados a la condición de las discontinuidades estimados a partir de observaciones y bibliografía son similares a los obtenidos a partir del GSI (Gráfico 3). En los sectores 1 y 2, los puntajes calculados a partir del GSI son mayores que los estimados a partir de observaciones y bibliografía, mientras que en el sector 3, el rango de puntajes calculado a partir del GSI queda englobado por los puntajes obtenidos a partir de observaciones y bibliografía. Cabe mencionar que los rangos de puntaje al estimar la condición de las discontinuidades a partir del GSI son menores que los rangos de puntaje al estimarla de bibliografía, siendo de 6 puntos frente a 10 puntos, respectivamente. Esto puede deberse a la falta de precisión de la información bibliográfica disponible.

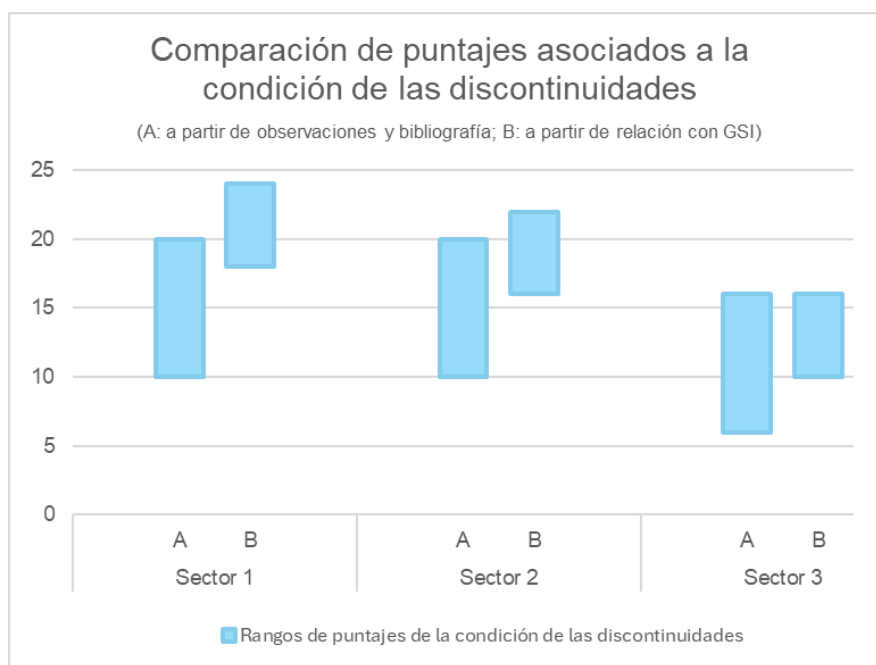


Gráfico 3: Comparación de los puntajes asociados a la condición de las discontinuidades para cada sector

Considerando lo anterior, se podría decir que la determinación de la condición de las discontinuidades a partir de la relación con el GSI es una aproximación bastante buena. Así, esta forma de cálculo podría ser una alternativa viable para poder determinar parámetros que no sean posibles de obtener de forma directa a partir del análisis del macizo rocoso con fotogrametría. Por esto mismo, será importante hacer una buena estimación del GSI para reducir la incertidumbre.

Respecto al GSI, se trabajó con rangos de 10 unidades para evitar riesgos debido a la escala de trabajo. Se obtuvo un GSI de 62-72 para el sector 1, 55-65 para el sector 2 y 43-53 para el sector 3. A partir de estos resultados se obtuvo un RQD de 60-80% para el

sector 1, 52-72% para el sector 2 y 40-60% para el sector 3. Estos valores varían en un 20%, y aunque es una variación relativamente alta, es la precisión que permite la resolución de la nube de puntos utilizada sin correr mayor riesgo de sobreestimar la clasificación del macizo rocoso.

En relación a la condición de las discontinuidades, se obtuvo 18-24 puntos para el sector 1, 16-22 puntos para el sector 2 y 10-16 puntos para el sector 3. Como se menciona anteriormente, estos rangos de variación son menores a los obtenidos a partir de bibliografía, pero terminan siendo similares en cuanto a calidad geotécnica, pudiendo representar una buena alternativa de estimación, especialmente en casos de escasa información bibliográfica.

Es fundamental señalar que el GSI influirá directamente en los resultados del RMR si se opta por calcular el RQD y la condición de las discontinuidades basándose en su relación con el GSI. Si el GSI fuera sobreestimado, los puntajes asociados al RQD y condición de las discontinuidades también serán sobreestimados. Por ello, igualmente se recomienda calcular un estimado de los puntajes a partir de bibliografía para poder hacer comparaciones. Incluso con un GSI estimado correctamente, los puntajes podrían diferir de los obtenidos a partir de bibliografía en casos donde la información existente sea escasa o de muy baja precisión.

Finalmente, es importante destacar que el sector 1 es el de mejor calidad geotécnica y el sector 3 el de peor calidad geotécnica, para ambos sistemas de clasificación, en la Tabla 18 se muestra un resumen de los resultados. Además, en el afloramiento se observan bloques caídos principalmente en el sector 3. Estos bloques son en su mayoría pequeños (~50 cm o menos), lo que concuerda con una peor calidad geotécnica del macizo rocoso. En el sector 2 también hay bloques caídos de tamaño pequeño, pero probablemente pertenecen a las intercalaciones que se encuentran muy fracturadas y no a los estratos de mayor espesor que se observan menos fracturados. Por esto mismo, el sector 2 es de mejor calidad que el sector 3 ya que se encuentra menos fracturado en gran parte de los estratos. El sector 1 no cuenta con presencia de estratos muy fracturados y tiene una apariencia más competente y menos meteorizada en comparación a los otros sectores, esto también concuerda con los resultados obtenidos, donde este sector es el de mejor calidad geotécnica.

Tabla 18: Resumen de los resultados de la clasificación geotécnica según RMR y GSI

	RMR_1	RMR_2	RMR_3	RMR_4	GSI
SECTOR 1	62 ± 5 Clase II-III	51 ± 5 Clase III	68 ± 3 Clase II	57 ± 3 Clase III	62-72
SECTOR 2	57 ± 5 Clase II-III	46 ± 5 Clase III-IV	61 ± 3 Clase II-III	50 ± 3 Clase III	55-65
SECTOR 3	48 ± 5 Clase III	37 ± 5 Clase III-IV	50 ± 3 Clase III	39 ± 3 Clase III-IV	40-50

6 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se elaboró una metodología de clasificación de macizo rocoso utilizando fotogrametría digital, la cual ha sido aplicada en un afloramiento ubicado en la quebrada Lo Cañas. Posee un enfoque principalmente cualitativo y sirve para el estudio de cualquier macizo rocoso, ya sean afloramientos naturales o macizos asociados obras de ingeniería como taludes o túneles.

La metodología desarrollada busca clasificar un macizo rocoso según RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Marinos & Hoek, 2000) de forma remota, principalmente en zonas de difícil acceso o que representen un peligro para la integridad de las personas a cargo de su estudio. Esta metodología se compone de cuatro etapas principales: selección del área de estudio y recopilación de bibliografía y/o datos de terreno previos; captura de fotografías de la zona para la construcción de la nube de puntos 3D y descripción general del macizo rocoso; análisis estructural con *Discontinuity Set Extractor* y análisis cinemático opcional; y finalmente, levantamiento de información geotécnica y clasificación del macizo rocoso con RMR y/o GSI.

La metodología propuesta presenta varias ventajas sobre los métodos convencionales. Mejora la seguridad al eliminar la necesidad de acercarse físicamente al macizo rocoso, protegiendo la integridad de los profesionales. Además, permite la toma de datos estructurales en zonas elevadas, inaccesibles en terreno. La generación de una nube de puntos 3D facilita la visualización del macizo rocoso desde distintos ángulos, proporcionando un análisis más completo de su estructura. El uso de DSE permite un análisis estructural de alta precisión y rapidez, con una visualización gráfica de las discontinuidades que facilita el entendimiento de las estructuras del macizo. Asimismo, la metodología puede abarcar grandes áreas en menos tiempo, siendo útil para proyectos de gran envergadura. También, permite un monitoreo continuo del macizo rocoso y sus cambios con el tiempo, lo que podría ser útil para estudios de peligros. Finalmente, el uso de drones la opción más económica en casos de inaccesibilidad, incluso sin problemas de acceso, levantar una gran cantidad de datos tomaría más horas de trabajo en terreno, implicando un mayor costo de personal.

Sin embargo, también es importante considerar algunas limitaciones. Una de las principales es la influencia de la escala de detalle, pues la máxima resolución de las imágenes no permite la obtención de la apertura y el relleno, y debe ser muy alta para captar la rugosidad. Al no poder estimar todos los parámetros necesarios para la clasificación de macizo rocoso, se pierde precisión en comparación a los métodos convencionales, pero los resultados al utilizar la metodología desarrollada en este estudio igualmente son acertados. A pesar de poseer desventajas, las ventajas son mayores especialmente en casos donde es peligroso acceder al macizo rocoso o donde hay falta de acceso.

En el caso de estudio se evaluaron diferentes escenarios para el RMR, considerando la presencia de nieve y la forma de estimación de la condición de las discontinuidades. Esto permitió una comparación exhaustiva y una clasificación más robusta del macizo rocoso. Se recomienda aplicar la metodología evaluando los distintos escenarios mencionados en este trabajo, es decir, considerar cómo afecta la presencia de nieve y calcular el RMR estimando la condición de las discontinuidades (y el RQD de ser posible) a partir de observaciones y bibliografía para poder comparar estos resultados con los entregados por la estimación del RQD y la condición de las discontinuidades a partir del GSI.

Las estimaciones del RMR que se basan en observaciones y bibliografía para la obtención de la condición de las discontinuidades (RMR_1 y RMR_2) son más conservadoras, ya que consideran escenarios donde la calidad del macizo rocoso podría ser peor. Sin embargo, las estimaciones basadas en el GSI (RMR_3 y RMR_4) son similares geotécnicamente, por ende, se puede concluir que estimar la condición de las discontinuidades a partir del GSI representa una aproximación bastante buena y podría ser una alternativa viable para determinar parámetros que no se pueden obtener directamente a partir del análisis del macizo rocoso con fotogrametría.

Se debe destacar que los resultados del RMR y GSI son consistentes entre ellos y concuerdan con lo esperado. El sector 1 es el de mejor calidad y el sector 3 el de peor calidad geotécnica para ambos sistemas de clasificación. Esto concuerda con la apariencia del macizo rocoso, pues el sector 3 se encuentra mucho más fracturado y presenta mayor cantidad de bloques caídos en relación a los otros sectores.

La aplicación de la metodología propuesta para la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital indica que es posible usar esta técnica de manera exitosa, complementándola con bibliografía, presentándose como una alternativa conveniente para casos donde sea difícil acceder al macizo rocoso o que represente un peligro para la integridad del personal a cargo. Claramente, la técnica también sirve de complemento para casos donde se pueda trabajar en terreno con métodos convencionales, pudiendo llevar a cabo estudios mucho más completos.

6.1 RECOMENDACIONES

El desarrollo de este estudio abre nuevas posibilidades dentro del campo de la Geología Aplicada a la Ingeniería. La fotogrametría como herramienta para la caracterización y clasificación de macizo rocoso puede facilitar el análisis de áreas que no han podido ser estudiadas con los métodos convencionales, por ello se señalan algunas recomendaciones para futuros estudios.

Es importante comprender el funcionamiento de la técnica y de los softwares utilizados antes de aplicar la metodología, lo que disminuirá el tiempo de procesamiento y obtención

de resultados. Se podrían desarrollar capacitaciones a los profesionales involucrados en la aplicación de esta metodología, asegurando una implementación más eficiente. De todas formas, en este trabajo se realiza una explicación lo suficientemente detallada del funcionamiento de la fotogrametría y de las principales funciones de los softwares empleados.

En la aplicación de la metodología se trabajó con una nube de puntos de resolución intermedia, en el sentido de que no se captan bien los detalles centimétricos. Esto produjo que no fuera posible determinar el RQD y la rugosidad de las discontinuidades de forma directa. Para aplicaciones futuras, se recomienda trabajar con nubes de puntos de mejor resolución, idealmente centimétrica, para determinar el verdadero alcance de la metodología y ver si efectivamente es posible determinar la rugosidad con esta resolución. Además, se podría determinar el RQD directamente de la nube de puntos y ver cómo se compara con el obtenido a partir de la relación con el GSI.

Bajo esta misma línea, la sectorización del macizo rocoso podría ayudar a definir dominios geotécnicos, pudiendo seleccionar pequeñas zonas representativas de cada sector. Así se podría generar una nube de puntos de calidad ultra alta en *Agisoft Metashape* que permitiría detectar más detalles, pudiendo recortar estas zonas representativas para ser estudiadas por separado en DSE y *CloudCompare*, evitando la ralentización o el fallo del procesamiento por la capacidad del equipo utilizado. De esta forma, se podría trabajar con nubes de puntos de mayor resolución obteniendo resultados más precisos.

Además, se recomienda tomar fotografías a distintas alturas, pudiendo cubrir de mejor manera el macizo rocoso, disminuyendo la aparición de zonas con falta de datos al construir la nube de puntos 3D. En este trabajo, las fotografías fueron tomadas a una misma altura (o muy similar), por ende hubo zonas que quedaron con vacíos en la nube de puntos 3D. En la misma línea, se podrían diseñar y documentar protocolos estándar para la captura de las imágenes, pudiendo mejorar la consistencia y reproducibilidad de los resultados.

A su vez, podría ser interesante implementar la metodología con otras técnicas de adquisición de imágenes, como escaneos láser, en vez de fotografías capturadas con drones, lo que permitiría obtener una nube de puntos de mayor resolución.

Finalmente, se podrían verificar los resultados de este trabajo visitando el afloramiento estudiado. O bien, podría aplicarse la metodología en un macizo rocoso de fácil acceso o previamente estudiado con métodos convencionales, para determinar cómo se comparan los resultados de la clasificación de forma remota con los resultados obtenidos *in situ*.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0*.
<https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6, 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- Coelho, L., & Brito, J. N. (2007). *Fotogrametria Digital*. EDITORA DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.
<https://www.researchgate.net/publication/371753614>
- Coelho, N. (2019). *CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E ESTRUTURAL DE UM MACIÇO DE ROCHAS CARBONATADAS COM APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FOTOGAMETRIA: CASO DE ESTUDO APLICADO A UMA PEDREIRA DE ROCHA INDUSTRIAL* [Tesis de Magíster]. Universidade de Coimbra.
- Deere, U., & Deere, W. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) in Practice. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984*, 91–101.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. En *Earth Surface Processes and Landforms* (Vol. 38, Número 4, pp. 421–430). <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Girardeau-Montaut, D. (2012). *CloudCompare 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project*. <https://www.danielgm.net/cc/>
- Gonzalez de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. PEARSON.
- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock Slope Engineering* (3ra ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781482267099>
- Hoek, E., Carter, T., & Diederichs, M. (2013). Quantification of the Geological Strength Index Chart. *47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013*, 3, 1757–1764.
- Lara, M. (2007). *METODOLOGIA PARA LA EVALUACION Y ZONIFICACION DE PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA CON APLICACION EN QUEBRADA SAN RAMON, SANTIAGO ORIENTE, REGION METROPOLITANA* [Memoria para optar al título de Geóloga, Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología]. Universidad de Chile.

- Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI-A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng2000)*.
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2007). Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. En *Underground Works under Special Conditions* (pp. 13–21). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/NOE0415450287.ch2>
- Palmstrom, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 362–377. www.elsevier.com/locate/tust
- Riquelme, A. (2023a). *DSE - DISCONTINUITY SET EXTRACTOR*. <https://personal.ua.es/es/ariquelme/dse-discontinuity-set-extractor.html>
- Riquelme, A. (2023b). *DSE - WIKI - ASIGNACIÓN DE FAMILIAS A PUNTOS*. <https://personal.ua.es/es/ariquelme/dse-wiki/dse-wiki-asignacion-de-familias-a-puntos.html>
- Riquelme, A. (2023c). *DSE - WIKI - CÁLCULO DE NORMALES*. <https://personal.ua.es/es/ariquelme/dse-wiki/dse-wiki-calculo-de-normales.html>
- Riquelme, A. (2023d). *DSE - WIKI - DENSIDAD DE POLOS*. <https://personal.ua.es/es/ariquelme/dse-wiki/dse-wiki-densidad-de-polos.html>
- Rocscience. (s. f.). *Dips | Analyze orientation-based geological data*. Recuperado 13 de julio de 2024, de <https://www.rocscience.com/software/dips>
- Salinas, E. (2018). *Análisis de propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile* [Memoria para optar al título de Geólogo]. Universidad de Chile.
- Salvini, R., Vanneschi, C., Coggan, J. S., & Mastrorocco, G. (2020). Evaluation of the Use of UAV Photogrammetry for Rock Discontinuity Roughness Characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(8), 3699–3720. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02130-2>
- Sant'Anna, S. N. (2020). *EMPREGO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL TERRESTRE PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE MACIÇOS ROCHOSOS. CASO DE ESTUDO NA PEDREIRA PARALISADA MARIANO DE ABREU, BELO HORIZONTE/MG*. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Sepúlveda, S. (1998). *METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN AMBIENTES MONTAÑOSOS: APLICACIÓN EN LA QUEBRADA LO CAÑAS* [Memoria para optar al título de Geólogo]. Universidad de Chile.
- Thiele, R. (1980). *Geología de la Hoja Santiago: Región Metropolitana, escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile n°39*. Instituto de Investigaciones Geológicas.

- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J. L., Pagán, J. I., Asensio, J. L., & Ruffo, M. (2020). Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. *Revista de Teledetección*, 55, 1–15. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>
- Villarroel, R., & Vergara, M. (1988). La Formación Abanico en el área de los cerros Abanico y San Ramón, Cordillera de Santiago. *Actas V Congreso Geológico Chileno, Santiago*, 1, A327–A337.
- Yukselen-Aksoy, Y. (2010). Characterization of two natural zeolites for geotechnical and geoenvironmental applications. *Applied Clay Science*, 50(1), 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.015>
- Zhou, X., Chen, J., Chen, Y., Song, S., Shi, M., & Zhan, J. (2017). Bayesian-based probabilistic kinematic analysis of discontinuity-controlled rock slope instabilities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(4), 1249–1262. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0972-5>
- Zúñiga, J. (2016). *GENERACIÓN DE MODELOS TRIDIMENSIONALES A PARTIR DE FOTOGRAMETRÍA Y SU APLICACIÓN EN GEOLOGÍA ESTRUCTURAL* [Memoria para optar al título de Geólogo]. Universidad de Chile.

ANEXOS

ANEXO A

A continuación, se adjuntan las 42 fotografías utilizadas para la confección de la nube de puntos 3D.



Figura 37: Fotografía DJI_0594. Cortesía de Alex Garcés



Figura 38: Fotografía DJI_0595. Cortesía de Alex Garcés



Figura 39: Fotografía DJI_0596. Cortesía de Alex Garcés



Figura 40: Fotografía DJI_0597. Cortesía de Alex Garcés



Figura 41: Fotografía DJI_0598. Cortesía de Alex Garcés



Figura 42: Fotografía DJI_0599. Cortesía de Alex Garcés



Figura 43: Fotografía DJI_0600. Cortesía de Alex Garcés



Figura 44: Fotografía DJI_0601. Cortesía de Alex Garcés



Figura 45: Fotografía DJI_0602. Cortesía de Alex Garcés



Figura 46: Fotografía DJI_0603. Cortesía de Alex Garcés



Figura 47: Fotografía DJI_0604. Cortesía de Alex Garcés



Figura 48: Fotografía DJI_0605. Cortesía de Alex Garcés



Figura 49: Fotografía DJI_0606. Cortesía de Alex Garcés



Figura 50: Fotografía DJI_0607. Cortesía de Alex Garcés



Figura 51: Fotografía DJI_0608. Cortesía de Alex Garcés



Figura 52: Fotografía DJI_0609. Cortesía de Alex Garcés



Figura 53: Fotografía DJI_0610. Cortesía de Alex Garcés



Figura 54: Fotografía DJI_0611. Cortesía de Alex Garcés



Figura 55: Fotografía DJI_0612. Cortesía de Alex Garcés



Figura 56: Fotografía DJI_0613. Cortesía de Alex Garcés



Figura 57: Fotografía DJI_0614. Cortesía de Alex Garcés



Figura 58: Fotografía DJI_0615. Cortesía de Alex Garcés



Figura 59: Fotografía DJI_0616. Cortesía de Alex Garcés



Figura 60: Fotografía DJI_0617. Cortesía de Alex Garcés



Figura 61: Fotografía DJI_0618. Cortesía de Alex Garcés



Figura 62: Fotografía DJI_0619. Cortesía de Alex Garcés



Figura 63: Fotografía DJI_0620. Cortesía de Alex Garcés



Figura 64: Fotografía DJI_0621. Cortesía de Alex Garcés



Figura 65: Fotografía DJI_0622. Cortesía de Alex Garcés



Figura 66: Fotografía DJI_0623. Cortesía de Alex Garcés



Figura 67: Fotografía DJI_0624. Cortesía de Alex Garcés



Figura 68: Fotografía DJI_0625. Cortesía de Alex Garcés



Figura 69: Fotografía DJI_0626. Cortesía de Alex Garcés



Figura 70: Fotografía DJI_0627. Cortesía de Alex Garcés



Figura 71: Fotografía DJI_0628. Cortesía de Alex Garcés



Figura 72: Fotografía DJI_0629. Cortesía de Alex Garcés



Figura 73: Fotografía DJI_0630. Cortesía de Alex Garcés



Figura 74: Fotografía DJI_0631. Cortesía de Alex Garcés



Figura 75: Fotografía DJI_0632. Cortesía de Alex Garcés



Figura 76: Fotografía DJI_0633. Cortesía de Alex Garcés



Figura 77: Fotografía DJI_0634. Cortesía de Alex Garcés



Figura 78: Fotografía DJI_0635. Cortesía de Alex Garcés

Ficha de levantamiento de datos geotécnicos para la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital

Información General

Comuna: LA FLORIDA Región: METROPOLITANA	Fecha: 04/06/2024
Ubicación de referencia: SECTOR 2	Levantado por: C. PAZ MUÑOZ SANTELICES
Proyecto: TRABAJO DE TÍTULO	
Coordenadas UTM: 361562.61 mE - 6288854.78 mN	Huso: 19S

Dimensiones del afloramiento: ~23 m de espesor, ~70 m de largo

Tipo de afloramiento	
Natural	X
Corte/talud	
Excavación subterránea	
Trinchera/pique	

Tipo de roca	
Glaciar	
Ígnea intrusiva	
Metamórfica no foliada	
Estratificadas (volcánicas - sedimentarias)	X
Metamórfica foliada	
Zona de alteración	

Estructura del macizo	
De acuerdo con GSI (Hoek & Marinos, 2000)	
Masivo	
Blocoso	X
Muy blocoso	
Perturbado	
Desintegrado	
Laminado/cizallado	

Condición de las discontinuidades	
Espaciamiento	0,2-0,6 m
Largo	>20 m
Apertura	N.A.*
Rugosidad	N.A.*
Relleno	N.A.*

Tamaño de bloques (cm)		
Dominante	150 y 50-60	85%
Máximo	750	5%
Mínimo	<50	10%

Tipo de bloques	
Irregulares	
Cúbicos	X
Tabulares	X
Prismáticos	

Grado de meteorización	
Fresca/sana	
Levemente meteorizada	X
Moderadamente meteorizada	
Altamente meteorizada	
Desintegrada	

RQD	
Establecer un rango solo si es posible calcularlo directamente o si se tienen datos de bibliografía/terreno	
90 - 100%	
75 - 90%	
50 - 75%	
25 - 50%	
< 25%	
No se puede calcular de forma directa	X

Sets principales	
Tipo	Orientación
1	49/93
3	86/353
3	83/56
3	90/98

Tipo de discontinuidades	
1	Estratificación
2	Foliación/clivaje
3	Diaclasa
4	Falla
5	Grieta de tracción

Humedad natural	
Seco	X
Húmedo	
Mojado	
Goteando	
Fluyendo	

Presencia de nieve	
Nula	
Esporádica	
Estacional	X
Continua	

Condición de las discontinuidades (Bieniawski, 1989)						
Espaciamiento	>2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	<0,06 m	
Largo	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m	
Apertura	Nula	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm	N.A.*
Rugosidad	MR	R	LR	S	P	N.A.*
Relleno	Sin relleno	Duro	Blando	<5 mm	>5 mm	N.A.*

*No Aplica. En la mayoría de los casos es posible que no se pueda determinar un valor concreto para apertura, rugosidad y relleno

Figura 80: Ficha de levantamiento de datos geotécnicos del sector 2

Ficha de levantamiento de datos geotécnicos para la clasificación de macizo rocoso mediante fotogrametría digital

Información General

Comuna: LA FLORIDA Región: METROPOLITANA	Fecha: 04/06/2024
Ubicación de referencia: SECTOR 3	Levantado por: C. PAZ MUÑOZ SANTELICES
Coordenadas UTM: 361562.61 mE - 6288854.78 mN	Huso: 19S
Dimensiones del afloramiento: ~45 m de espesor, ~70 m de largo	

Tipo de afloramiento	
Natural	X
Corte/talud	
Excavación subterránea	
Trinchera/pique	

Tipo de roca	
Glaciar	
Ígnea intrusiva	
Metamórfica no foliada	
Estratificadas (volcánicas - sedimentarias)	X
Metamórfica foliada	
Zona de alteración	

Estructura del macizo	
De acuerdo con GSI (Hoek & Marinos, 2000)	
Masivo	
Blocoso	
Muy blocoso	X
Perturbado	
Desintegrado	
Laminado/cizallado	

Condición de las discontinuidades	
Espaciamiento	0,2-0,6 m
Largo	>20 m
Apertura	N.A.*
Rugosidad	N.A.*
Relleno	N.A.*

Tamaño de bloques (cm)	%	
Dominante	50-60	80%
Máximo	350	5%
Mínimo	<50	15%

Tipo de bloques	
Irregulares	X
Cúbicos	
Tabulares	X
Prismáticos	

Grado de meteorización	
Fresca/sana	
Levemente meteorizada	
Moderadamente meteorizada	X
Altamente meteorizada	
Desintegrada	

RQD	
Establecer un rango solo si es posible calcularlo directamente o si se tienen datos de bibliografía/terreno	
90 - 100%	
75 - 90%	
50 - 75%	
25 - 50%	
< 25%	
No se puede calcular de forma directa	X

Sets principales	
Tipo	Orientación
1	49/93
3	86/353
3	83/56
3	90/98

Tipo de discontinuidades	
1	Estratificación
2	Foliación/clivaje
3	Diaclasa
4	Falla
5	Grieta de tracción

Humedad natural	
Seco	X
Húmedo	
Mojado	
Goteando	
Fluyendo	

Presencia de nieve	
Nula	
Esporádica	
Estacional	X
Continua	

Condición de las discontinuidades (Bieniawski, 1989)						
Espaciamiento	>2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	<0,06 m	
Largo	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m	
Apertura	Nula	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm	N.A.*
Rugosidad	MR	R	LR	S	P	N.A.*
Relleno	Sin relleno	Duro	Blando	<5 mm	>5 mm	N.A.*

*No Aplica. En la mayoría de los casos es posible que no se pueda determinar un valor concreto para apertura, rugosidad y relleno

Figura 81: Ficha de levantamiento de datos geotécnicos del sector 3