



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA DE POSGRADO**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

MENCIÓN GEOTECNIA Y VÍAS TERRESTRES

TESIS

**ANÁLISIS, DE LA DESIGNACIÓN DE CALIDAD DE ROCA EN LA
CARRETERA SAN JERÓNIMO-PARURO KM.12,2022**

PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO

EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN GEOTECNIA Y

VÍAS TERRESTRES

AUTOR

Br. JIMMY OMAR VILLAFUERTE TOLEDO

ASESOR:

Mg. JUAN FRANCISCO SOTO ELGUERA

CÓDIGO ORCID: 000-0002-5029-4284

CUSCO-PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor JUAN FRANCISCO SOTO EL GUERRA.....
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: ANÁLISIS DE LA DESIGNACIÓN DE LA
CALIDAD DE ROSAS EN LA CARRETERA SAN JERÓNIMO - PARURO
Km. 13, 2022.....

Presentado por: Jimmy Oyarvide Salazar Toledo..... DNI N° 98930387.....;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
MECANICA ESTRUCTURAL Y VÍAS TERRESTRES.....
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 01.00%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 11 de AGOSTO..... de 2026.....

[Firma]
Firma

Post firma Juan Francisco Soto El Guerra

Nro. de DNI 98922623

ORCID del Asesor 00-0002-5029-4248

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 97859.613705879

Jimmy Omar Villafuerte Toledo

tesis con levantamiento de observaciones final julio 31 noche .pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:613705879

215 páginas

Fecha de entrega

11 ago 2026, 9:40 a.m. GMT-5

38.431 palabras

215.560 caracteres

Fecha de descarga

11 ago 2026, 9:54 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

tesis con levantamiento de observaciones final julio 31 noche .pdf

Tamaño del archivo

8.0 MB

1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Exclusiones

- N.º de fuente excluida
- N.º de coincidencia excluida

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
49 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
10 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA DE POSGRADO

INFORME DE LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES A TESIS

Dr. LEONCIO SOLIS QUISPE, Director de la Escuela de Posgrado, nos dirigimos a usted en condición de integrantes del jurado evaluador de la tesis intitulada ANÁLISIS DE LA DESIGNACION DE CALIDAD DE ROCA EN LA CARRETERA SAN JERONIMO-PARURO Km.12,2022 del Br. JIMMY OMAR VILLAFUERTE TOLEDO. Hacemos de su conocimiento que el sustentante ha cumplido con el levantamiento de las observaciones realizadas por el Jurado el día VEINTICINCO DE JUNIO DE 2026.

Es todo cuanto informamos a usted fin de que se prosiga con los trámites para el otorgamiento del grado académico de MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN GEOTECNIA Y VÍAS TERRESTRES.

Cusco, 07 AGOSTO 2026

DR. ADAN WILBERT SOLORZANO MONTESINOS
Primer Replicante

MG. DILSON ELVIS LOAIZA CRUZ
Segundo Replicante

MGT. MIJAIL ELIO ROZAS GOMEZ
Primer Dictaminante

MGT. MIGUEL ANGEL VILCA ROJAS
Segundo Dictaminante

DEDICATORIA

Alvaro Rodrigo

Maria Ximena

Lucia Mariana

AGRADECIMIENTO

Agradecer a la Universidad Nacional de San Antonio Abad y por intermedio a cada uno de los Docentes de la Maestría profesional, por haber contribuido en nuestra formación profesional, muchas gracias.

Agradecer a los Docentes dictaminantes de la Universidad, por sus sugerencias, que sirvieron para ajustar y orientar de mejor manera el trabajo de investigación, muy agradecido por todos sus consejos.

Igualmente agradecer al Magister. Juan Francisco Soto Elguera amigo personal y asesor del trabajo, por su apoyo en la orientación del trabajo de investigación.

Agradecimientos a Álvaro mi hijo por su apoyo en la toma de datos de campo y todas las personas que contribuyeron al desarrollo del trabajo, a los cuales les quedo muy agradecido.

JIMMY

ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	xviii
INTRODUCCIÓN	xx
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.1 Situación problemática.....	22
1.2 Formulación del problema	25
1.2.1 Problema general	25
1.2.2 Problemas específicos.....	26
1.3 Justificación de la investigación	26
1.3.1 Justificación metodológica.....	26
1.3.2 Justificación Técnica.....	27
1.3.3 Justificación Económica	27
1.3.4 Justificación Ambiental.	27
1.3.5 Justificación social.....	28
1.4 Objetivos de la investigación	28
1.4.1 Objetivo general.....	28
1.4.2 Objetivos específicos	28
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	29
2.1 Bases teóricas.....	29
2.1.1 Talud rocoso en infraestructura vial	29

2.1.2	Estabilidad de taludes rocosos viales: modos de falla y parámetros clave	
	29	
2.1.3	Discontinuidades del macizo y medición en talud.....	30
2.1.4	Designación del macizo rocoso (RQD)	30
2.1.5	Método RQD: Detail Line	31
2.1.6	Procedimientos del RQD sin sondeo	31
2.1.7	Antecedentes Teóricos	35
2.1.8	El RMR (Rock Mass Rating).....	38
2.1.9	Q (Rock Tunneling Index).....	38
2.1.10	GSI (Geological Strength Index).....	38
2.1.11	Parámetro de calidad de Roca	40
2.1.12	Procedimiento para cálculo del RQD	42
2.1.13	Limitaciones del RQD y de la estimación sin sondeo.....	44
2.1.14	Las discontinuidades rocosas	45
2.1.15	Métodos de clasificación en zonas rocosas	48
2.1.16	RQD en ingeniería civil.....	48
2.1.17	El RQD sin sondeo	48
2.1.18	Tipos de discontinuidades.	50
2.1.19	Tipos de Fracturas.	50
2.1.20	Geología general	55
2.1.21	Geología en carreteras.....	55
2.1.22	Geomorfología	56
2.1.23	Cobertura del suelo.....	56
2.1.24	Grupo de San Jerónimo	57
2.1.25	Representación estereográfica.....	59

2.1.26	Número de familias presentes	59
2.2	Antecedentes de la investigación	60
2.2.1	Antecedentes Internacionales.....	60
2.2.2	Antecedentes Nacionales	61
2.2.3	Antecedentes Locales.....	62
CAPITULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES		64
3.1	Hipótesis	64
3.2	Hipótesis General.....	64
3.2.1	Hipótesis Específicas	64
3.3	Identificación de variables e indicadores	64
3.3.1	Variable Independiente	65
3.3.2	Variable Dependiente.....	65
3.4	Operacionalización de variables	65
CAPITULO IV. METODOLOGÍA		68
4.1	Ámbito de estudio: localización política y geográfica.....	69
4.2	Localización política.....	69
4.3	Tipo y nivel de investigación.....	70
4.3.1	Tipo de investigación.....	70
4.3.2	Nivel de Investigación	70
4.4	Unidad de análisis	71
4.5	Dominio de estudio	72
4.6	Población de estudio	72
4.7	Tamaño de muestra	72

4.8	Técnicas de selección de muestra	73
4.9	Técnicas de análisis e interpretación de la información	75
CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		80
5.1	Procesamiento, análisis, interpretación y discusión de resultados.....	80
5.1.1	Procesamiento	80
5.1.2	Metodología	82
5.1.3	Análisis	83
5.1.4	Procesado de la información del macizo en Dips	84
5.1.5	Estimación del espaciamiento entre fracturas.....	108
5.1.6	Prueba de hipótesis	111
5.2	Interpretación de resultados del RQD sin sondeo.....	114
5.2.1	Origen del sesgo.....	124
5.2.2	Análisis de la persistencia de los macizos rocosos	125
5.3	Determinación de interacción de los set.	131
5.4	Presentación de resultados	172
CONCLUSIONES		174
RECOMENDACIONES.....		179
BIBLIOGRAFÍA		180
ANEXOS		187
Anexo 1: Matriz de consistencia.....		187
Anexo 2: Cálculo vectorial		188
Anexo 3: Fracturas globales.....		189
Anexo 4: Instrumentos de recolección de información		190
Anexo 5: Medios de verificación.....		194

Anexo 6: Ajuste de distribución a distribución exponencial	194
Anexo 7: Certificados de calibración de los equipos utilizados	195
Anexo 8: Informe técnico, caracterización estructural (fracturas) de macizo rocoso en talud vial.....	202
Anexo 9: Validación técnico-académica del modelamiento geomecánico (%RQD) por detail line	207

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro de denominación, calificación y % de RQD	41
Tabla 2 Relación del espaciado de fracturas y el tipo de macizo rocoso.....	46
Tabla 3 Valores considerados para espaciamiento de fracturas.....	48
Tabla 4 Matriz de Operacionalización de Variables	65
Tabla 5 Caracterización y descripción en campo del macizo rocoso	71
<i>Tabla 6</i> Sectores de muestreo y características de las líneas de muestreo	73
<i>Tabla 7</i> Detalle de la plantilla muestral, de la información recogida en campo.....	81
Tabla 8 Orientación de cada set para sector 01	87
Tabla 9 Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 01	89
Tabla 10 Orientación de cada set para sector 02.....	95
Tabla 11 Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 02.....	97
Tabla 12 Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 02.....	102
Tabla 13 Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 03.....	105
Tabla 14 Resumen consolidado Sector 01,02 y 03	108
Tabla 15 Longitudes por Sectores y set	109
Tabla 16 Prueba de Bondad de ajuste y parámetro de distribución	111
Tabla 17 Prueba de Bondad de ajuste y parámetro de distribución	112
Tabla 18 Prueba de Bondad de ajuste y parámetro de distribución	114
Tabla 19 Cálculo de las discontinuidades del RQD sin sondeo.....	115
Tabla 20 Calificación de Sectores y Sets identificados	116
Tabla 21 Calificación de Sectores y Sets identificados	128
Tabla 22 Prueba de Kruskall-Wallis: RQD vs.FF/M.....	130
Tabla 23 Valores para adaptar el resultado respecto a sus valores relativos	134
Tabla 24 Resumen consolidado de sets, sus orientaciones y densidad lineal.	135

Tabla 25 Líneas de muestreo de toma de datos, en campo por sectores y sus orientaciones	135
Tabla 26 Líneas de muestreo de toma de datos, en campo por sectores y sus orientaciones	136
Tabla 27 Intersección de sets, y orientación de las líneas de sus intersecciones	137
Tabla 28 Ángulos de intersección (δ_i), entre las líneas de muestreo y los Sets.....	139
Tabla 29 Frecuencia de fracturas en las líneas de intersección y los Sets).....	140
Tabla 30 Resumen de ajuste para ff/m & %RQD, del área del estudio	153
Tabla 31 Verificaciones de Supuestos	156
Tabla 32 Parámetros descriptivos	156
Tabla 33 Anova frecuencia de fracturas y % RQD.....	157
Tabla 34 Contraste post-hoc de tukey	158
Tabla 35 Cuadro comparativo p valor, niveles de significancia, niveles de confianza y riesgo.....	159
Tabla 36 Valores extremos con intervalo de confiabilidad del 95%	165
Tabla 37. Datos Consolidados	203
Tabla38 Parámetros de Orientación media de los Clusters Principales.....	205
Tabla39 Denominación y Rango de Similitud Estructural	205
Tabla40 Especificaciones técnicas.....	206

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de medición lineal para la evaluación del RQD	33
Figura 2 Modelo de muestreo de un talud, en línea de detalle	33
Figura 3 Gráfico del diagrama de discontinuidades en el Dips	34
Figura 4 Gráfico del diagrama de discontinuidades en el Dips	34
Figura 5 Modelo de cálculo de la longitud de muestra de testigo	37
Figura 6 <i>Flujograma de evaluación del RQD</i>	43
Figura 7 Gráfico esquemático de las principales características de las discontinuidades y su presentación tridimensional.....	47
Figura 8 <i>Fracturación del macizo rocoso tramo San Jerónimo – Paruro km 12.....</i>	47
Figura 9 <i>Toma de muestras de la medida de discontinuidad del macizo rocoso en el tramo San Jerónimo – Paruro km 12.....</i>	51
Figura 10 <i>Tipos de diaclasas que presentan las rocas</i>	52
Figura 11 <i>Propiedades geométricas del macizo rocoso a nivel de fracturamiento....</i>	55
Figura 12 <i>Formación Kayra y Soncco se encuentra el tramo San Jerónimo – Paruro km 12.....</i>	58
Figura 13 <i>Formación Grupo San Jerónimo (Kayra), en el tramo de estudio.</i>	58
Figura 14 <i>Fundamentos de Proyección Estereográfica (Proyección de Lambert)</i>	59
Figura 15 <i>localización política.....</i>	69
Figura 16 <i>Vista del sector, con presencia de rocas de capas rojas.....</i>	76
Figura 17 <i>Vista de afloramiento rocoso disperso en el sector</i>	76
Figura 18 <i>Vía San Jerónimo – Paruro km. 12.....</i>	77
Figura 19 <i>Corte talud donde se evidencia la presencia del talud, zona</i>	77
Figura 20 <i>Corte talud, se evidencia la presencia de las capas rojas, zona 2.....</i>	78
Figura 21 <i>Corte talud donde se evidencia la presencia de las capas rojas, zona 3.....</i>	78

Figura 22 Flujograma de Análisis.....	83
Figura 23 <i>Proyección de polos, Sector 01</i>	85
Figura 24 <i>Curvas de isógonas porcentuales – Sector 01</i>	86
Figura 25 <i>Identificación de concentraciones -Sector 01</i>	86
Figura 26 <i>Diagrama de roseta dominio N1 y N2 -Sector 01</i>	88
Figura 27 <i>Histograma de Dip Sector 01 -Set 1</i>	90
Figura 28 <i>Histograma de Dip Dir Sector 01 -Set 1</i>	91
Figura 29 <i>Histograma de Dip Sector 01 -Set 2</i>	91
Figura 30 <i>Histograma de Dip Dir Sector 01 -Set 2</i>	92
Figura 31 <i>Distribución de Polos Sector 02</i>	93
Figura 32 <i>Curvas de isógonas porcentuales e identificación de Set -Sector 02</i>	94
Figura 33 <i>Identificación de concentración – Sector 02</i>	94
Figura 34 <i>Diagrama de roseta dominio N1 – Sector 02</i>	96
Figura 35 <i>Histograma de Dip Sector 02 -Set 1</i>	97
Figura 36 <i>Histograma de Dip Sector 02 -Set 1</i>	99
Figura 37 <i>Proyección de polos, Sector -03</i>	100
Figura 38 <i>Curvas de isógonas porcentuales e identificación de Set -Sector 03</i>	101
Figura 39 <i>Curvas de isógonas porcentuales e identificación de Set -Sector 03</i>	102
Figura 40 <i>Diagrama de roseta dominio N1 – Sector 03</i>	104
Figura 41 <i>Histograma de Dip Sector 03 -Set 1</i>	105
Figura 42 <i>Histograma de Dip dir Sector 03 -Set 1</i>	106
Figura 43 <i>Histograma de Dip Sector 03 -Set 2</i>	107
Figura 44 <i>Histograma de Dip dir Sector 03 -Set 2</i>	107
Figura 45 <i>Distribución de espaciamiento de fracturas Sector 01</i>	112
Figura 46 <i>Distribución de espaciamiento de fracturas Sector 02</i>	113

Figura 47 Distribución de espaciamiento de fracturas Sector 03	114
Figura 48 Distribución espacial de longitudes y parámetros para sector1,set1 y set 2 y aleatorio.....	118
Figura 49 Distribución espacial de longitudes y parámetros para sector 2, set1, set2 y aleatorio.....	119
Figura 50 Distribución espacial de longitudes y parámetros para sector 3, set1, set2 y aleatorio.....	121
Figura 51 Distribución espacial de parámetros del macizo rocos RQD, Dipdir y Dip para los tres sectores 01,02 y 03	123
Figura 52 Sesgo de muestreo en la longitud de las discontinuidades.	126
Figura 53 Normalidad ff/m	129
Figura 54 Normalidad RQD	129
Figura 55 Sistema de referencia cartesiano	132
Figura 56 Intersección de dos planos.....	132
Figura 57 Orientación respecto de las referencias coordenadas.	133
Figura 58 Orientación de intersección entre planos.....	137
Figura 59 <i>Líneas de azimut y buzamiento para el sector en estudio</i>	141
Figura 60 <i>Representación de los ángulos δ_i entre los sets y la línea de muestreo 01</i>	142
Figura 61 <i>Representación de los ángulos δ_i entre los sets y la línea de muestreo 02</i>	143
Figura 62 <i>Representación de los ángulos δ_i entre los sets y la línea de muestreo 03</i>	144
Figura 63 Distribución espacial de la intersección de los tres sets de fracturas	145

Figura 64 Red de distribución espacial de fracturas como componentes de los tres sets de fracturas.....	149
Figura 65 Sectorización de distribución espacial de fracturas como componentes de los tres sets.....	150
Figura 66 Grafica de verificación de ajuste a FDP, normal de los valores de ff/m..	151
Figura 67 Grafica de verificación de ajuste a FDP, normal de los valores de RQD %	152
Figura 68 Correlación entre ff/m & RQD para toda el área de estudio	153
Figura 69 Mapa integral de los valores para los II y grupo III	157
Figura 70 Mapa integral de los valores para las densidades de fracturas en el área de estudio	160
Figura 71 Mapa integral de los valores para la % RQD en el área de estudio	161
Figura 72 Mapa integral de los valores para la calidad de macizo rocos en el área de estudio	162
Figura 73 Distribución espacial de las ff/m en el macizo rocoso en el área de estudio	163
Figura 74 Distribución espacial de %RQD, en el macizo rocoso en el área de estudio	164
Figura 75 Gráfico ff/m & ubicación en el macizo rocoso	164
Figura 76 Modelo cubico sector 01 de fracturas macizo rocoso	167
Figura 77 Modelo cubico sector 02 de fracturas macizo rocoso	167
Figura 78 Modelo cubico sector 03 de fracturas macizo rocoso	168
Figura 79: Modelo digital, mapa de Cluster y Orientaciones en el Talud de Carretera tramo11+500 carretera San Jeronimo-Paruro	202
Figura 80. Análisis de Orientación Angular	204

Figura 81: Análisis Vectorial Geográfico.....	204
--	-----

GLOSARIO

Sigla	Definición
ANOVA	: Análisis de Varianza
CI / IC (95 %)	: Confidence Interval / Intervalo de Confianza (95 %)
Dip	: Buzamiento de un plano de discontinuidad
Dip dir	: Dirección de buzamiento (azimut hacia donde se inclina el plano)
DIPS	: Software para análisis estereográfico de discontinuidades
ff/m	: Frecuencia de fracturas por metro (expresión práctica de λ)
FDP	: Función de Densidad de Probabilidad
GSI	: Geological Strength Index
H_0 / H_1	: Hipótesis nula / Hipótesis alternativa
λ (lambda)	: Frecuencia lineal de fracturas
NC (95 %)	: Nivel de confianza del 95 %
NGI	: Norwegian Geotechnical Institute
Q	: Rock Tunneling Quality Index
RMR	: Rock Mass Rating
RQD	: Rock Quality Designation / Designación de Calidad de Roca
%RQD	: Porcentaje del índice RQD reportado
r	: Coeficiente de correlación de Pearson
SPSS	: Paquete de software estadístico
t-test	: Prueba t de significancia
UCS	: Uniaxial Compressive Strength / Resistencia a Compresión Uniaxial
α	: Nivel de significancia estadística
δ_i	: Ángulo entre la línea de muestreo y la traza del set de fracturas

RESUMEN

El estudio caracteriza la calidad del macizo rocoso aflorante en el talud vial de la carretera San Jerónimo, carretera Cusco- Paruro km. 12; para estimar y cartografiar la distribución del RQD sin sondeo y priorizar la gestión del activo vial. El problema surge por el alto fracturamiento visible y la necesidad de una estimación rápida y costo-efectiva cuando no hay perforaciones diamantinas. Se evaluaron 149,5 m de frente con 900 discontinuidades en tres sectores.

Metodológicamente, se adoptó la correlación Detail Line propuesta por Priest & Hudson, adecuada para estimar el %RQD a partir de la frecuencia lineal de fracturas (λ , ff/m), utilizando la relación exponencial entre λ y RQD. Se procedió con levantamiento estructural en talud, análisis estereográfico y procesamiento estadístico (DIPS 7.0, Statgraphics 19, EasyFit 5.5), además de la representación temática de la distribución espacial del %RQD por sectores.

El estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y corte transeccional, y un alcance descriptivo–correlacional–explicativo, incorporando un componente probabilístico basado en intervalos de confianza al 95 %.

Los resultados muestran valores de %RQD compatibles con clases de macizo desde “Regular” a “Muy bueno”, con concentraciones más bajas en el Sector 03 (≈ 68 –74 %) y más altas en el Sector 02 (≈ 92 –97 %), lo que evidencia heterogeneidad espacial y tramos críticos que requieren mayor vigilancia. Se integró, además, un enfoque probabilístico (IC 95 %) que permite reportar escenarios optimista, realista y pesimista del %RQD por dominio geomecánico, útil para planeamiento de conservación.

Palabras clave: RQD, Calidad de roca, Probabilístico, Frecuencia de fracturas.

ABSTRACT

The study characterizes the quality of the outcropping rock mass along the road cut slope on the Cusco–Paruro road (San Jerónimo sector, km 12) to estimate and map RQD without coring and support road asset management. The problem stems from the high degree of visible fracturing and the need for a rapid, cost-effective %RQD estimate when diamond coring is unavailable. The surveyed frontage totaled 149.5 m, with 900 discontinuities measured across three sectors.

Methodologically, the Detail Line correlation by Priest & Hudson was adopted to estimate %RQD from linear fracture frequency (λ , fractures/m) using the exponential λ –RQD relationship. Field work included structural mapping on the cut slope, stereographic analysis, and statistical processing (DIPS 7.0, Statgraphics 19, EasyFit 5.5), plus thematic mapping of the spatial distribution of %RQD by sector.

The study follows a quantitative approach, with a non-experimental, cross-sectional design and a descriptive–correlational–explanatory scope, incorporating a probabilistic component based on 95% confidence intervals.

Results indicate %RQD classes from “Fair” to “Very Good”, with lower concentrations in Sector 03 (≈ 68 –74%) and higher in Sector 02 (≈ 92 –97%), evidencing spatial heterogeneity and critical reaches that warrant closer monitoring. A 95% CI framework was integrated to report optimistic, realistic, and pessimistic %RQD scenarios by geomechanical domain, useful for maintenance planning.

Keywords: RQD; rock quality; fracture frequency

INTRODUCCIÓN

El trabajo se orienta al análisis del RQD (Rock Quality Designation), del sector ubicado en la carretera de San Jerónimo - Paruro km 12, presenta los resultados del análisis de la calidad y clasificación geomecánica en el espacio donde se encuentra el talud del macizo rocoso que posibilitó el análisis de la fracturación y su relación con el RQD con relación al sector en estudio. En ese sentido el contenido de cada uno de los temas está articulado de acuerdo con el modelo teórico y metodológico establecido, el cual se desarrolla en función a los problemas, objetivos y metodología, además de considerar su desarrollo bajo el estricto cumplimiento del reglamento que orienta la presentación de los trabajos de investigación; por lo que de acuerdo con todos estos criterios podemos indicar que el desarrollo de cada uno de los capítulos contiene los siguientes desarrollos:

El primer capítulo, se centra en la descripción de los aspectos relacionados con la fundamentación del problema, que involucra en su proceso varios criterios metodológicos; dentro de los cuales se tiene el fundamento de la situación problemática que justifica los criterios centrales de la investigación sobre el RQD, luego se realiza la formulación del problema cuyo proceso se desarrolla sobre el tipo de designación del macizo rocoso del talud de San Jerónimo – Paruro km 12, además de fundamentar adecuadamente la justificación desde diferentes perspectivas o criterios, esta parte se concluye con la delimitación o alcance que tendrán los objetivos respecto al estudio a través del análisis, descripción y a establecer el valor más probable del RQD.

En el capítulo segundo, se presenta el marco teórico general del estudio, en el que se definen las bases teóricas de cada uno de las teorías desarrolladas y que se relacionan con el tema motivo de estudio, y aplicadas para el mismo, al igual que la definición conceptual de cada una de las categorías utilizadas en el estudio; luego se centra en describir los antecedentes empíricos de la investigación, tomando en consideración tres niveles de antecedentes del

estudio: internacional, nacional y local; todos ellos engloban en marco de la investigación del RQD.

En el capítulo tercero, se aborda el ítem de la descripción del tema central en concordancia al problema planteado, ¿cuyo diagnóstico será la valoración del RQD?; también se determinó las variables de designación de la roca para el análisis; las cuales permiten la operacionalización de las variables y la identificación de las dimensiones planteadas para el presente estudio.

El cuarto capítulo, se centra en la metodología, que comprende los aspectos conceptuales en el tipo y nivel de investigación; además se desarrollan cada una de las unidades de análisis que corresponden a la población y tamaño del estudio; dentro del cual también se describen los procesos técnicos de la selección de muestra y recojo de información, como parte del proceso de desarrollo del trabajo desplegado en cada una de sus etapas. En esta etapa se realiza la recopilación de la data que servirán como fundamento de la investigación, el capítulo se concluye con la descripción de cada una de las técnicas para el análisis de datos asociada al RQD.

Finalmente, el último capítulo se expone el análisis descriptivo del procesamiento gráfico estereográfico con el apoyo de software Dips y herramientas estadísticas de cada una de las áreas de toma de muestras concluyentes en figuras y cuadros, cuyos resultados y discusión fueron debidamente organizadas; los cuales se centran en la sistematización, análisis, interpretación y validación de resultados; que son los argumentos centrales del trabajo de investigación y que permitió determinar los criterios de la calidad de roca (RQD) y el nivel de fracturas del macizo rocoso.

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

La región Cusco presenta un relieve montañoso caracterizado por la presencia de macizos rocosos fracturados, formaciones sedimentarias y procesos de meteorización que influyen significativamente en el comportamiento geotécnico de los taludes. Esta condición convierte la caracterización estructural del macizo rocoso en una tarea esencial para garantizar la seguridad y funcionalidad de las carreteras, especialmente en zonas de difícil acceso o con alta pendiente.

La construcción de infraestructura civil en el mundo está muy diversificada y extendida, dentro de la cual se encuentra la construcción de carreteras, muchas de ellas atraviesan macizos rocosos, estos presentan características estructurales complejas que influyen directamente en la seguridad y durabilidad de las obras. En el contexto andino del Perú, la variabilidad geológica y topográfica genera desafíos adicionales: los cortes de talud exponen rocas con altos grados de fracturamiento, meteorización y discontinuidades, condiciones que complican su caracterización geotécnica.

Villamil (2010) señala que la tecnología moderna se basa en plantear procedimientos y mecanismos para obtener muestras, con el fin de determinar los componentes del transporte, en particular en los bloques rocosos con menor consolidación y estabilidad; además, se toma en cuenta la formación de compuestos y estratos de roca que se encuentran fragmentadas o suaves.

Sin embargo, estas dificultades son superadas en gran medida por las diferentes metodologías para determinar la calidad de los macizos rocosos y el conocimiento sobre el nivel de fracturamiento de los mismos. Fernández et al. (2017) quien señala que, existen diferentes modelos para calificar los macizos rocosos, dentro de ellos se encuentra la

metodología del Rock Mass Rating (RMR), planteada por Bieniawski en 1973 y el índice Q, propuesto por Barton y Lien en 1974.

Asimismo, dentro de estas metodologías se encuentra la clasificación geomecánica RQD (Rock Quality Designation) propuesta por Deere (1967), que define el RQD como el porcentaje de testigo recuperado en el sondeo de longitud superior a 10 cm respecto a la longitud total del sondeo (Eadic: Formación y Consultoría, 2021). Este parámetro constituye la base de las principales clasificaciones geomecánicas.

En esa línea, Deere (1967) no incluyó un procedimiento específico para medir el RQD directamente sobre taludes expuestos. Posteriormente, Priest y Hudson (1976) propusieron la metodología de la Línea de Detalle (Detail Line), aplicable a la medición superficial del espaciamiento de fracturas. Dicha correlación se adopta en este estudio por su adecuación a macizos rocosos sedimentarios con fracturamiento sistemático y orientación homogénea. En contraste, la correlación empírica de Palmström (1982, 2005) fue desarrollada para macizos ígneos con fracturamientos irregulares, razón por la cual no se ajusta al tipo de roca presente en el tramo analizado.

Considerando que no se realizaron perforaciones diamantinas para el logueo sistemático, se aplicó la metodología de Priest y Hudson (1976) mediante la toma de valores de fracturas en el talud expuesto, representativo del macizo rocoso. Estas mediciones permiten una estimación indirecta y estadísticamente confiable del RQD.

El modelo del RQD, se utiliza para analizar la calidad del macizo rocoso del área de estudio, y las características que presenta ya sean menos fracturadas o de mayor fracturamiento; por lo que conocer las singularidades del macizo rocoso permiten determinar una calificación dentro del parámetro de calidad de roca planteada por Bieniawski (1973); por lo tanto, conocer estas características permitirá obtener información más precisa sobre la calidad estructural del macizo, utilizando el RQD, como uno de sus parámetros principales de evaluación,

directamente relacionado con el problema objeto de estudio; resultando de mucha importancia el establecer la distribución espacial de fracturas, las cuales pueden servir para tomar decisiones adecuadas en el desarrollo de la zona de trabajo.

En este sentido, se definieron tres sectores de estudio (Sector 01, 02 y 03) que en conjunto representan una longitud de 149,5 m lineales, sobre los cuales se realizaron las mediciones de campo. El problema principal radica en la falta de estudios locales que apliquen y validen la correlación empírica de Priest y Hudson (1976) para estimar el RQD en taludes viales de la región Cusco, lo cual limita la caracterización estructural de los macizos sedimentarios andinos.

El estudio desarrollado a partir del método RQD sin sondeo, permite establecer, la calidad del macizo rocoso, así como la posibilidad de movimientos de bloques de rocas; lo que permitirá identificar sectores de menor calidad de roca y apoyar la planificación de obras viales con mayor sustento técnico, a través de la identificación de zonas rocosas de baja calidad, que no sustentan la estructura de ingeniería.

El Perú, tiene una geología diversa y una topografía accidentada, por lo que es usual que presenten problemas de características geológicas desfavorables al momento de la construcción de carreteras de mayor o menor dimensión, hecho que genera un sobre costo al realizar un corte de talud en roca; sin embargo este tipo de obras de ingeniería representan un desafío que en muchos casos no siempre son bien conocidos; en particular la falta de conocimiento del RQD sin sondeo, constituye en una limitante para una mejor construcción de vías.

La investigación realizada, se encuentra en la Región de Cusco, en el tramo carretero de San Jerónimo – Paruro Km 12, donde el macizo rocoso está constituido por areniscas del grupo geológico “Capas Rojas”, afectadas por procesos de meteorización y fracturamiento. La zona presenta precipitaciones intensas entre diciembre y abril, lo que incrementa la inestabilidad

local de los taludes y dificulta el mantenimiento de la vía. En este contexto, se considera pertinente analizar la calidad del macizo rocoso mediante el modelo RQD sin sondeo de Priest y Hudson (1976) para establecer la distribución de la calidad de roca y aportar información útil para la planificación de obras viales en condiciones geológicas similares.

En síntesis, se propone aplicar y calibrar localmente la metodología Detail Line, generar cartografía temática de %RQD por sectores y tramo, y derivar criterios operativos útiles para la priorización de conservación.

1.2 Formulación del problema

La investigación se desarrolló en el tramo del talud rocoso de la carretera San Jerónimo – Paruro, km 12, donde aflora un macizo rocoso de areniscas del grupo geológico “Capas Rojas”. En campo se identificaron fracturas de distintas magnitudes y orientaciones, cuya distribución irregular evidencia una alta heterogeneidad estructural. Se registraron 900 puntos de medición en un tramo de 149.5 m lineales, permitiendo obtener datos de espaciamiento, dirección e inclinación (buzamiento) de las discontinuidades.

Sin embargo, no existen estudios locales que correlacionen la frecuencia de fracturas con los valores de RQD determinados sin sondeo, lo que dificulta caracterizar con precisión la calidad del macizo rocoso. Por ello, se plantea abordar este vacío metodológico aplicando una correlación empírica basada en parámetros estructurales medibles en campo y cartografiando la distribución del %RQD.

Se plantea la presente interrogante:

1.2.1 Problema general

¿Cómo estimar y cartografiar la designación de calidad de roca (RQD) sin sondeo en el talud rocoso de la carretera San Jerónimo–Paruro, km 12, a partir de parámetros estructurales medibles (frecuencia y espaciamiento de fracturas)?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la caracterización estructural (frecuencia, orientación e inclinación/buzamiento) de las fracturas por sectores en el talud km 12?
- ¿Cuál es el valor promedio y el valor más probable del %RQD, y cómo se distribuye espacialmente por sectores y en el tramo completo, estimado sin sondeo mediante la metodología Detail Line?
- ¿Qué relación estadística existe entre la densidad y la frecuencia de fracturas y el %RQD estimado sin sondeo en el talud km 12?

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Justificación metodológica

La investigación se justifica metodológicamente porque adapta y calibra, en un contexto local andino y sobre macizos sedimentarios del tipo areniscas “Capas Rojas”, una correlación empírica que permite estimar la designación de calidad de roca (RQD) sin recurrir a sondeos. La pertinencia metodológica radica en utilizar parámetros estructurales medibles en campo (frecuencia y espaciamiento de fracturas), para obtener un indicador geomecánico objetivo y cartografiable a escala de talud. Se elige la metodología de Detail Line propuesta por Priest y Hudson por su idoneidad en macizos sedimentarios con patrones de fracturamiento relativamente sistemáticos, lo que mejora la consistencia de la estimación indirecta del RQD en el tramo analizado. Esta elección se considera más adecuada que otras correlaciones desarrolladas para macizos ígneos con fracturamientos más irregulares.

Por lo cual, la adaptación local constituye un aporte metodológico concreto: calibración de la relación entre densidad de fracturas y porcentaje de RQD, generación de cartografía temática de su distribución espacial y formalización de un protocolo replicable de levantamiento y procesamiento. Se reconoce, además, el alcance del método: el RQD no evalúa

rugosidad, alteración de juntas ni condiciones de agua; dichas variables quedan fuera del objeto del estudio y se declaran explícitamente como limitaciones.

1.3.2 Justificación Técnica

Desde el punto de vista técnico, contar con una estimación del RQD con resolución espacial a lo largo de un talud vial permite mejorar la gestión de la infraestructura. La cartografía del porcentaje de RQD facilita identificar tramos con menor calidad relativa del macizo, priorizar actividades de conservación y monitoreo, y estandarizar la lectura del estado geomecánico mediante un indicador objetivo. Este enfoque se orienta a la caracterización y a la gestión de activos viales, sin abordar diseño de estabilidad ni dimensionamiento de obras específicas, pero aportando insumos consistentes para que las áreas responsables planifiquen de manera más informada sus intervenciones.

1.3.3 Justificación Económica

La estimación del RQD sin sondeo aporta eficiencia económica en corredores andinos donde la perforación diamantina resulta costosa y compleja. La metodología basada en mediciones de fracturas reduce tiempos y costos de campo, minimiza interferencias en la operación de la vía y permite focalizar recursos en los sectores que lo requieren, a partir de la distribución espacial del indicador. De este modo, la asignación presupuestal para conservación puede apoyarse en criterios objetivos que orienten la priorización por tramos, disminuyendo gastos innecesarios y favoreciendo decisiones costo-efectivas a escala de proyecto y de red vial.

1.3.4 Justificación Ambiental.

El enfoque propuesto disminuye la huella ambiental asociada al levantamiento, al prescindir de perforaciones y de la logística pesada que éstas implican. La posibilidad de representar el RQD de forma espacialmente continua favorece el diseño de intervenciones puntuales y selectivas, reduciendo movimientos de material y el impacto paisajístico en el

entorno del talud. En consecuencia, la caracterización indirecta del macizo contribuye a una gestión más compatible con el ambiente durante las labores de conservación y mantenimiento.

1.3.5 *Justificación social.*

El uso de un indicador estandarizado y fácilmente comunicable como el porcentaje de RQD facilita la coordinación entre las instancias técnicas a cargo de la vía. La representación cartográfica del indicador mejora la transparencia y la trazabilidad de las decisiones de priorización, favorece la comunicación con supervisiones y auditorías, y fortalece la gestión institucional al disponer de criterios homogéneos para comparar tramos dentro de una misma red.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 *Objetivo general*

Desarrollar y aplicar un modelo empírico local para estimar y cartografiar el RQD sin sondeo en el talud km 12, usando frecuencia y el espaciamiento de fracturas.

1.4.2 *Objetivos específicos*

- Caracterizar la frecuencia, la orientación y la inclinación de las fracturas por sectores en el talud km 12.
- Estimar y cartografiar el %RQD (valor promedio y valor más probable) por sectores y para el tramo completo, mediante la metodología Detail Line.
- Cuantificar la relación entre densidad y la frecuencia de fracturas y el %RQD mediante análisis de correlación y regresión, verificando normalidad y linealidad.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas

El estudio se desarrolló en el talud carretero, esto es, la superficie del macizo rocoso expuesta por el corte ejecutado para alojar la vía. En el sector analizado, el talud presenta una inclinación aproximada de 75° - 80° respecto al plano horizontal. Los taludes pueden ser naturales (laderas) o artificiales (cortes/terraplenes); en este caso se trata de un talud artificial. La investigación se orienta a describir las fracturas (familias, espaciamiento, persistencia y buzamiento) y a estimar el RQD sin sondeo mediante líneas de detalle en tres sectores del talud artificial.

2.1.1 Talud rocoso en infraestructura vial

Un talud carretero es la superficie del macizo rocoso expuesta por el corte para alojar la vía. Su geometría (altura, ángulo, bermas y drenaje superficial) se define en función del contexto geológico y de la funcionalidad de la carretera. En etapas de estudio y diseño, la caracterización estructural del talud (familias de discontinuidades, espaciamiento, persistencia y buzamiento) brinda insumos objetivos para la planificación constructiva y el mantenimiento rutinario; en particular, permite sectorizar tramos de diferente comportamiento geotécnico y priorizar intervenciones. (MTC, 2018)

2.1.2 Estabilidad de taludes rocosos viales: modos de falla y parámetros clave

En cortes carreteros de macizo rocoso, la estabilidad está condicionada por la orientación y condición de las discontinuidades respecto a la cara del talud. Los modos de falla más habituales son: (i) planar, cuando una familia desfavorable aflora en el talud; (ii) por cuña, por intersección de dos o más familias; y (iii) por vuelco, cuando las trazas son aproximadamente perpendiculares a la cara del talud. La caracterización estructural (familias, espaciamiento S, persistencia y buzamiento) obtenida en campo permite:

- identificar sets desfavorables y su potencial cinemático;
- estimar la fragmentación (vía %RQD sin sondeo), útil para prever caída de fragmentos, raveling y necesidades de mantenimiento (limpieza, mallas, bulonado local);
- definir sectorización geomecánica de la vía para priorizar drenaje superficial, bermas y tratamientos de protección;
- proveer insumos a clasificaciones (p. ej., RMR, GSI) cuando el alcance del proyecto lo requiera.

2.1.3 Discontinuidades del macizo y medición en talud

Detail Line o scanline permite cuantificar en superficie el grado de fracturamiento del macizo mediante el conteo de intersecciones y la medición de espaciamientos sobre una línea de muestreo. Con ff/m y S se estima el RQD (%) sin sondeo, generando valores por estación, sector y tramo, y posibilitando cartografía de la distribución del indicador en el talud. Esta adaptación es pertinente para macizos sedimentarios con patrones de fractura relativamente sistemáticos, como en el tramo evaluado.

2.1.4 Designación del macizo rocoso (RQD)

En el caso de taludes viales, el RQD se emplea como indicador del grado de fracturamiento visible en el corte; en este estudio se estima sin sondeo a partir de parámetros estructurales medidos en la superficie del talud.

Deere (1967) quien desarrollo el índice RQD (Rock Quality Designation) lo define como “el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo”. Es conocida también, como “índice de calidad de la roca” de siglas RQD (Rock Quality Designation) Existen diversos conceptos que podemos establecer claramente para el RQD.

Según Saricam & Ozturk (2018) indican que, el RQD es utilizado para los diseños geotécnicos, así como para evaluaciones dinámicas de las pendientes de las rocas y excavaciones subterráneas,

2.1.5 Método RQD: Detail Line

Se adopta el enfoque de Priest & Hudson (Detail Line) por su idoneidad en macizos sedimentarios y por operar directamente sobre el corte carretero, utilizando frecuencia y espaciamiento como base de la estimación.

Para establecer el RQD en el área de investigación, al no haberse realizado muestreo por perforaciones diamantinas para la estimación del RQD, (que es la metodología inicial planteada por Deere), se recurre a la correlación entre las fracturas que se presentan (afloran), por intercepción con el plano del talud, las mismas que se vinculan entre sí por relaciones empíricas para determinar su valor en el macizo rocoso; para lo cual dentro del RQD existen tres métodos de cálculo, uno de ellos es el Detail Line planteado por Priest y Hudson.

El método, consiste en realizar mediciones a lo largo de una línea de muestreo y establecer la separación promedio y frecuencia de fractura lineal, para el caso se toman más de una línea de detalle que permite obtener la relación del número de fracturas en una determinada línea, las que se irán tratando individualmente para cada caso y longitud total de la muestra (Seguret & Guajardo, C., 2015).

En ese sentido el cálculo del RQD se realiza tomando el número de fracturas por metro lineal, que permite determinar a partir del levantamiento lineal o “Detail line” en el talud de muestreo realizado en el tramo San Jerónimo - Paruro.

2.1.6 Procedimientos del RQD sin sondeo

- Primera etapa

Dentro del proceso de trabajo, dada la extensión 149.5 m, y de acuerdo a criterio de orientación de los taludes, se seleccionaron sectores de muestreo (Tramo1, tramo2, tramo3), además cada tramo de muestreo contiene diferentes longitudes de muestreo por limitaciones

de la wincha, evitar pandeo de la wincha al momento de realizar las mediciones, y mantener en todo momento la horizontalidad de la wincha de apoyo, este trabajo de seleccionados en campo de acuerdo a como se visualiza los taludes, en esta se considera además las actividades de registro en campo, se menciona diferentes metodologías que engloba el proceso de muestreo exploratorio en macizos rocosos que, se utiliza en las actividades de exploración minera, y geología estructural fundamentalmente, dentro de los cuales podemos mencionar para la presente investigación.

- Segunda etapa

El vaciado de información de tomas de campo en tabla Excel, para posteriormente proceder a la ubicación de concentraciones preferenciales de los valores (muestras), graficados utilizando representaciones estereográficas 3D, así como rosetas preferenciales, que ayudaran a visualizar y cuantificar los sectores (set), preferenciales de las fracturas en el área de estudio, para este propósito se utilizara software DIPS v.7.0.(Figura.02 y 03) respectivamente

-Tercera etapa

El cálculo del RQD se realiza a partir del conteo del número de fracturas de acuerdo con el metraje se obtendrán además valores preferenciales y valores medios obtenidos, a partir del muestreo de la roca y su estructura

En este proceso el RQD se establece tomando como medida la longitud de la pared o talud expuesto y muestreada; de acuerdo con lo demostrado por Priest y Hudson (1976) que plantean el siguiente criterio para determinar el RQD, representándose en la fórmula siguiente:

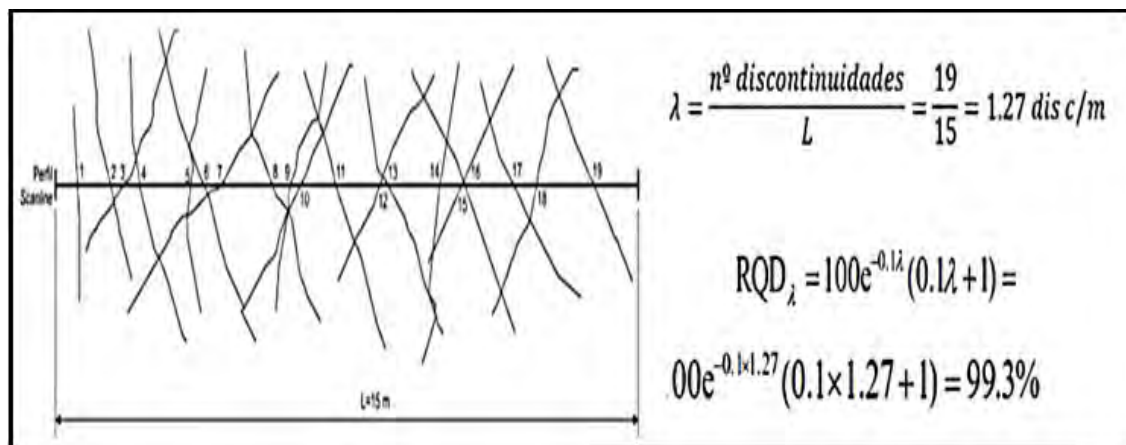
$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

Dónde el valor de: λ = Nro. de fracturas / Longitud muestreada.

Las calificaciones del RQD planteadas por Priest y Hudson (1976), permite estimar el promedio de discontinuidades de carácter conservador.

Osinergmin (2017) también considera el método alternativo que permiten el cálculo del RQD aplicado al mapeo de fracturas en la pared, la que consiste en medir de manera convencional el RQD para la obtención de muestras, es decir el descrito y denominado “línea de detalle” o cinta métrica que se coloca en la pared, como se presenta la siguiente (**Figura 1**).

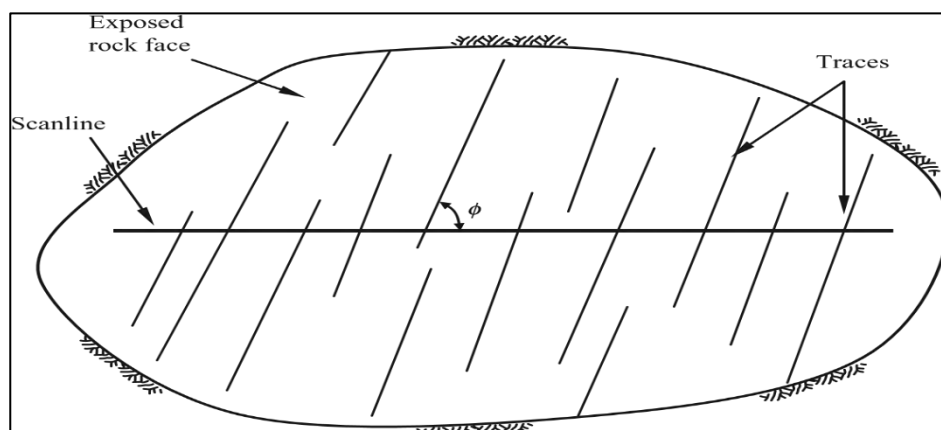
Figura1
Proceso de medición lineal para la evaluación del RQD



Nota: En detalle se muestra, el número de discontinuidades interceptadas en la longitud 15 metros, la densidad lineal de discontinuidad es 1.27. Fuente: Priest y Hudson (1976).

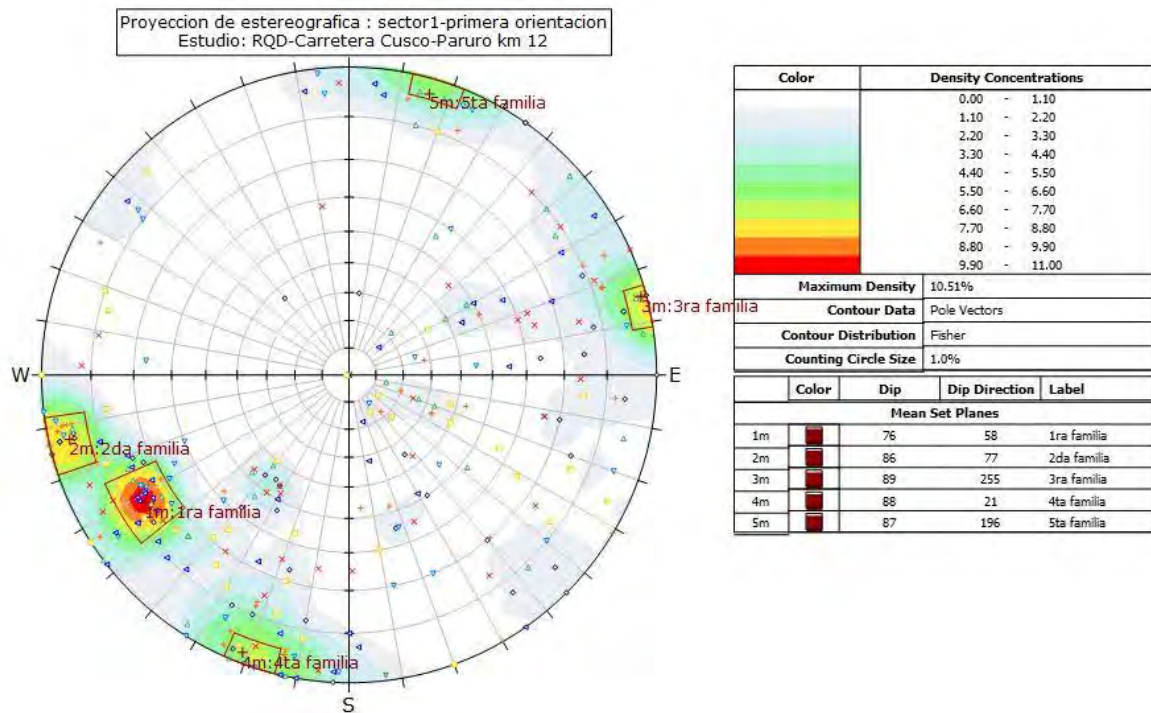
El modelo que para el presente estudio establece el número de discontinuidades, que se presenta o' la frecuencia lineal, la que nos permitió estimar la intensidad de las fracturas, la que se consigue aplicando el criterio como se presenta en la (**Figura 1**), donde se suma el número de interrupciones o fracturas por metro de muestreo en campo.

Figura2
Modelo de muestreo de un talud, en línea de detalle



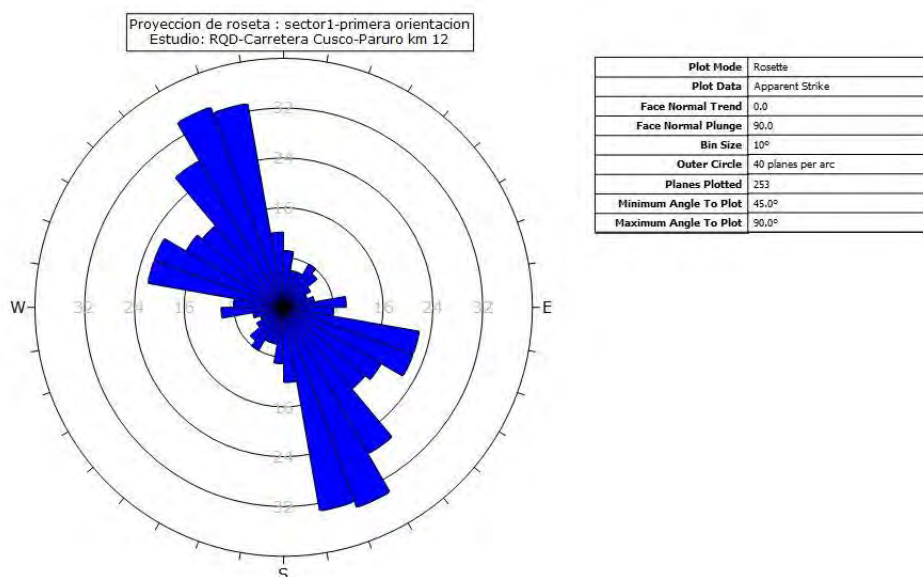
Nota: Detalle del muestreo de discontinuidades en una pared de roca expuesta, se evidencia el trazo de “línea de detalle. Fuente: Zhang (2017).

Figura3
Gráfico del diagrama de discontinuidades en el Dips



Nota. Detalle de la tendencia de formación familias. Fuente: Dips. Elaboración propia

Figura4
Gráfico del diagrama de discontinuidades en el Dips



Nota. Detalle del diagrama de rosetas. Elaboración propia

La determinación del índice de calidad rocosa, se estableció en función del resultado que arroja la medición de las longitud de las diferentes líneas de detalle, en el talud en estudio, en una dimensión de 149.5 m. para los tres distintos tramos en que se dividió el sector según fundamentalmente su orientación respecto del norte, referencial, su tratamiento, su explicación y al final la estimación del tipo de calidad de la roca ya sea, cuantitativamente y cualitativamente de acuerdo al criterio de Deere (1988) ; para luego simular de acuerdo a los parámetros dominantes de la fracturas encontrados ;este será entonces un resultado que orienta al conocimiento específico de la zona y permitirá además tener el conocimiento sobre la calidad de la roca y sus implicancias en la vía carretera.

2.1.7 Antecedentes Teóricos

Una secuencia de los principales sistemas de clasificación de macizos rocosos nos mostrara.

El RQD (Rock Quality Designation)

Los autores que plantearon esta metodología para el cálculo del RQD inicialmente la orientaron a trabajos de sondeos en minería. John Deere & Deere (1988) refiere, que el índice de designación de la calidad de la roca (RQD) ya se conocía en 1920, el método permite tener

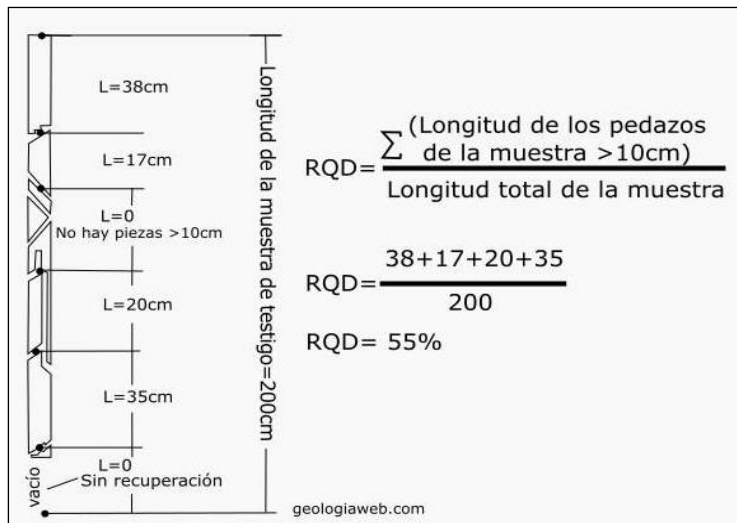
información de la calidad de la roca y de las descripciones geológicas y conocer el porcentaje de recuperación del núcleo o testigo (Core). La que se desarrolló con el fin de anticipar los riesgos en la construcción en la perforación de túneles, su utilidad se difundió debido a las singularidades mecánicas de la roca; en 1970 se consideró como una unidad básica en gran parte de los sistemas de clasificación de macizos rocosos, Como el índice Q, y el RMR. que son índices de clasificación del macizo, y que toman como parte de estos el RQD, junto con otros valores, es decir el RQD, forma parte de estos índices, y no es por sí solo un índice de clasificación de macizos rocosos.

La utilidad de este instrumento permite ubicar zonas de bajo RQD (sectorización geomecánica), que deben tener un mejor estudio y que pueden requerir un trabajo exhaustivo adecuado. Las referencias sobre el tema; evidencian el modelo como una práctica adecuada que se presenta como alternativa para la profundización de las formaciones rocosas y poder establecer el tipo de cimientos o reubicación de las obras de ingeniería planteadas.

Este procedimiento según Maldonado (2018) es ejecutado, midiendo muestras mayores a 10 cm las que se totalizan para un sector cualquiera que nos permitan calcular el RQD, es decir la misma definición de Deere, además estos muestreos permiten la identificación de diferentes zonas de fracturas, zonas de falla, planos de estratificación; que, se pueden evidenciar y que sirven y se toman como valores y poder realizar el cálculo de la estimación del RQD.

De acuerdo con Deere y Deere (1981) el cálculo se debe tomar en el eje del testigo, que es la forma más adecuada cuando hay presencia de fracturas inclinadas respecto del eje de la muestra cosa que además es más una regla que una excepción y además no se deben de tomar muestras de tramos alterados, así como fracturas frescas o recientes.

Figura5
Modelo de cálculo de la longitud de muestra de testigo



Nota. La longitud de muestras $>10\text{cm}$ e igual a 110 cm. Para una longitud de 200 cm; para el cálculo el RQD.

El procedimiento de sumar todos los fragmentos que sean iguales o mayores a 10 cm y luego dividir por la longitud total de la muestra tomada, dará por resultado 55%, para este ejemplo que constituye el porcentaje de calidad de la roca o RQD. Este ejemplo en porcentajes permite determinar que el RQD de la roca calculada se encuentra dentro del valor cuantitativo, de Regular que se considera dentro de (50% a 70%).

Por otro lado, Priest y Hudson en 1976, dieron a conocer un nuevo procedimiento para hallar el RQD de la roca en la *Revista Internacional de Mecánica de Rocas y Ciencias Mineras y Geomecánica*, plantean que el muestreo rocoso por la técnica Detail line (línea de detalle, o línea de muestreo), que a diferencia del anterior método este permite en el lugar procesar los datos obtenidos a través de indicadores el valor de lambda con su símbolo “ λ ” (frecuencia de fracturas unidad de longitud), que permite su cálculo mediante una expresión matemática ya mostrada.

2.1.8 El RMR (Rock Mass Rating)

Así mismo, la clasificación geomecánica planteada por Bieniawski (1973 a 1989) a partir de Rock Mass Rating (RMR) que consta de varios valores con distintas calificaciones cada uno, uno de ellos el RQD, según Alvarado Valdés (2020) plantea dos enfoques, el primero se basa en datos proporcionados del RMR a partir de una variable continua las fracturas son de este tipo, y podrían ser representadas mediante el modelo gaussiano; y el segundo usa simulación de puntajes subyacentes de RMR, considerando 6 parámetros (RQD, UCS, espaciamiento, condición fractura, condición agua, orientación excavación) como variables discretas.

2.1.9 Q (Rock Tunneling Index)

Propuesto por Barton, Lien y Lunde en 1973, del NGI, “*Instituto Noruego de Investigaciones*”, que fue el resultado de la evaluación de miles de experiencias en excavaciones subterráneas y por tal motivo concebido casi exclusivamente para evaluar la estabilidad de estas; introduce un concepto de dimensión de bloque, esfuerzo al corte entre bloque así como los esfuerzos activos. Además (Correa Villa, 2014) menciona que la teoría de Barton (1973) ayuda a entender el comportamiento de la resistencia en las fracturas o discontinuidades, y que son usados para entender el comportamiento de taludes.

2.1.10 GSI (Geological Strength Index)

Según Hoek y Brown (1980,1982), fue desarrollado para escalar la resistencia del macizo rocoso y es un sistema de clasificación geomecánica. El GSI(Índice de Esfuerzo Geológico), es el más reciente de los sistemas de clasificación de macizos rocosos, una manera de estimación del tipo de resistencia en un corte de roca del macizo rocoso y que reduce al máximo la evaluación del macizo rocoso, tomando en cuenta a solo dos los factores, el grado de fracturamiento que se observa en campo y se compara con una tabla gráfica y la forma en que se presenta las fracturas a la vista, esto se valora por gráfico estándar de tipo matricial de

tal manera que en las abscisas se observará la forma de fracturas (Estructura del macizo) y la ordenada el grado de fracturamiento (Condición de las estructuras) desarrollado para correlacionar la resistencia del macizo rocoso. Conforme el criterio Hoek y Brown a través de vincular a las constantes m y s , a partir del reconocimiento de las características de roca, y que fueron planteadas por Hoek y Brown en 1980 las mismas que fueron referidas en 1973 y mencionadas por Bieniawski (1989) y Barton et al (1974) en su trabajo

Las masas rocosas en general no son homogéneas, entre sus principales características geológicas y geomecánicas de un macizo rocoso, es universal la aceptación de su anisotropía, la que está separada por fallas, diaclasas, contactos geológicos, es más un macizo rocoso es definido como:

Macizo Rcoso=Matriz rocosa + discontinuidades.

De ahí que el RQD sea un instrumento importante en las obras civiles y se utilicen como parámetros estándar para el registro del núcleo, el cual es a su vez tomado en cuenta, en los sistemas de clasificación de rocas, siendo su aplicación simple, debido a que permite delimitar zonas de rocas en baja calidad, media y buena calidad, que pueden afectar negativamente a la estructura en conjunto.

En la actualidad, los estudios acerca del RQD, se centran en evidenciar las mejoras y déficit que presentan los cortes de talud, los que también son aplicados al análisis de sistemas digitales, eso mismo se mostrara al final del trabajo ya que este muestreo de macizos rocosos ya sea por la técnica del testigo o por la de línea de detalle reviste aspectos de realizaciones probabilísticas y en son muestras de interceptaciones pero no son el total del universo de fracturas en el macizo rocoso introduciendo por tanto aspectos de probabilísticos en sus realizaciones tanto de dip, dip direction o espaciamiento y longitud de las fracturas, los mismos que permite una estimación más realista del RQD así como simular las fracturas naturales; los conceptos son de aplicación universal tanto en vías terrestres, en trabajos de

minería subterránea o minería superficial esto como ya se dijo facilitara tener un mejor conocimiento del entorno; los estudios actuales sobre los diferentes tipos de rocas con características y propiedades físicas, ayudan en gran medida al conocimiento y características del estudio.

2.1.11 *Parámetro de calidad de Roca*

Como parte de la caracterización de los macizos rocosos, está considerado el RQD y su importancia es destacada por:

Rodríguez Sastre (2003) sugiere el estudio de discontinuidades en los macizos rocosos para determina los parámetros de resistencia de la matriz estudiada.

Maldonado y Soto (2018) señala que el RQD se usa como referencia y se mide en el muestreo de núcleos, el cual establece elementos para el sistema de clasificación de zonas rocosas, permitiendo establecer la calidad de macizos rocosos que podrían tener un efecto negativo en las obras de construcción; los mismos que permite tener una estimación sobre viabilidad de las bases de las construcciones e identificar problemas asociados con la geodinámica de la estructura que causa asentamiento, deslizamientos en las bases de los macizos rocosos.

En cambio, Solano (2016) argumenta que, al clasificar los macizos rocosos, se permite realizar un análisis y evaluación de diferentes las variables cualitativas, basando su argumento en dos modelos:

El primero de Bieniawski (1989) quién propone una clasificación para el estudio de zonas rocosas, cuya metodología es “Rock Mass Rating”, el cual considera seis parámetros para el cálculo: “Resistencia, Grado de fracturación, meteorización, condiciones de discontinuidades e infiltraciones”.

En segundo lugar, Laubscher (2000) quién presenta su clasificación basada en el RMR por su nombre Rock Mass Rating quien categoriza los macizos rocosos con un Rankin de 0 a 100 puntos.

En el desarrollo del trabajo de campo, se utilizó para el muestreo del modelo de RQD sin sondeo, tomando como base el muestreo y medición sobre corte talud, utilizando para este propósito brújula tipo brunton, cinta métrica 20 metros ; y un distanciómetro láser cuyas medidas variables, nos permitieron muestrear las longitudes de fracturas o persistencia en el macizo rocoso en una longitud de 149.5 m., las que servirán para la evaluación a partir del análisis de las fracturas, la calidad del índice de calidad de roca (RQD),que presenta el tramo carretero en estudio, pudiendo establecer el criterio de calificación y grado porcentual de acuerdo a la **(Tabla 1)**.

Tabla1
Cuadro de denominación, calificación y % de RQD

Calidad de roca	Calificación	RQD %
Muy mala (roca completamente meteorizada)	I	<25%
Mala (roca meteorizada)	II	25 a 50%
Media (Roca levemente meteorizada)	III	51 a 75%
Buena (Roca dura)	IV	76 a 90%
Muy buena (Roca fresca o intacta)	V	91 a 100%

Nota. Tabla de clasificación y valoración cuantitativa del RQD. Reproducida de Geologíaweb, <https://geologiaweb.com>.

De acuerdo con las características de la roca que se toma, en concordancia a la data y mediciones realizadas en el área de estudio, el cual permite una mejor identificación del macizo rocoso.

Los parámetros para la estimación del RQD sin sondeo que se usaron para identificar, nos proporcionan un indicador de calidad rocosa; el cual se utiliza ampliamente como parámetro

importante para los distintos sistemas de clasificación de macizo rocosos y sirven de advertencia para áreas de roca de baja calificación, los mismos que escapan a los propósitos de este estudio.

Cerdas Olaya (2013) afirma que, se pueden establecer los parámetros para macizos rocosos a partir de los siguientes factores:

El volumen de la roca y grado de fracturas condiciona el comportamiento, es decir tiene un carácter relativo respecto al volumen de referencia, así como otras propiedades y deformaciones; muchas fracturas pueden pocas para un gran volumen y viceversa el cual se realiza a partir de la caracterización de la dimensión de la masa rocosa que presenta dificultad.

Así mismo Olaya (2013) indica que el número y orientaciones de “familias de discontinuidades condiciona el comportamiento mecánico del macizo rocoso, su parámetro de rotura e incluso de un modelo de deformación”, que influye en la estabilidad de terreno.

Finalmente, el grado de meteorización, mayor o menor alteración que se tomara en campo de manera directa para estimar el grado de meteorización.

De acuerdo con estas consideraciones, se determinan los criterios mencionados y los parámetros que presentan los tipos de rocas.

2.1.12 Procedimiento para cálculo del RQD

De acuerdo con los requerimientos que presenta el trabajo y que en general se aplica en la metodología planteada, se puede describir los siguientes criterios considerados:

Se realizó el registro mediante el inventario en formato diseñado para este propósito de todas las fracturas en el lugar in situ, las medidas son de tipo correlativo, entre las diferentes fracturas este tipo de medición facilitara los cálculos posteriores a la hora de identificar la separación promedio entre fracturas, evitando a la vez acumulación de errores por lectura.

Las mediciones, se realizaron registros en cada inflexión de talud de roca, de modo que la línea de detalle muestre la roca en función a los 149.5 metros lineales en tres tramos consiguiendo una muestra total registrada de 900 valores muestrales; proceso que se realizó de

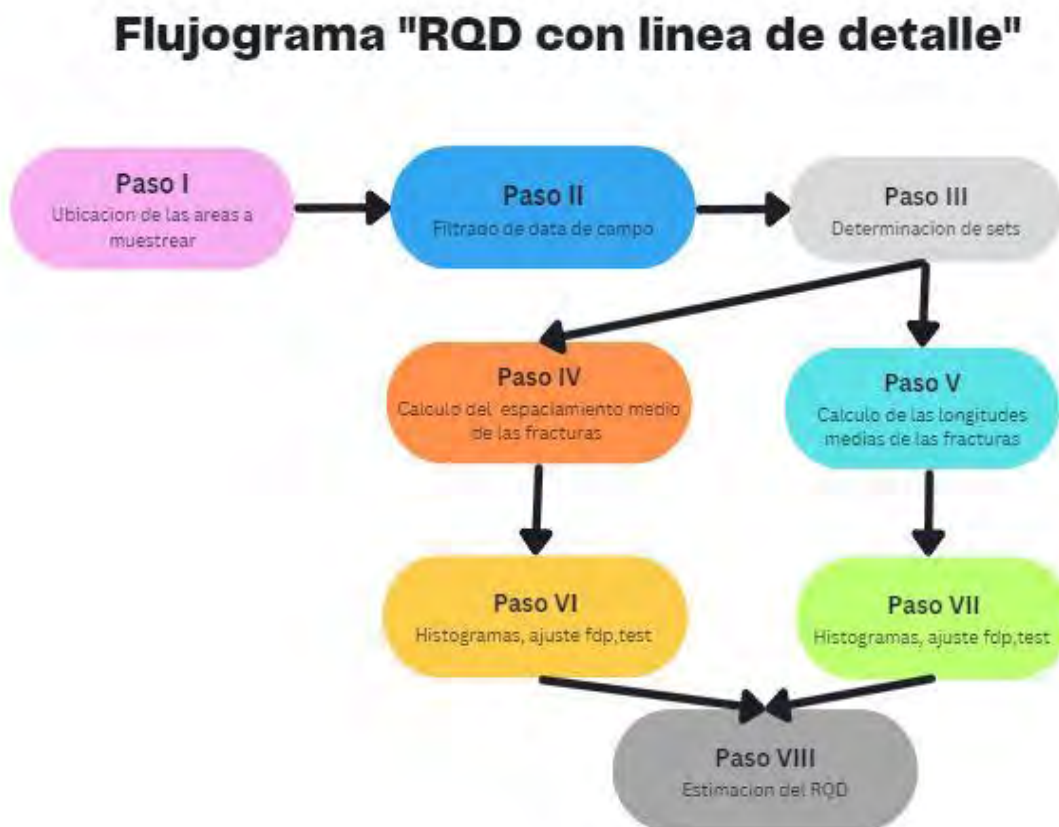
manera exhaustiva con la que se elaborara cálculos para llevar al resultado final de este proceso que fue sistematizada en cuadros Excel.

También se toma en cada punto de intercepción de fracturas los valores buzamientos (0° - 90°), respecto de un plano horizontal y dirección de buzamiento (0° - 360°) respecto del Norte referencial de la muestra, para la misma se utiliza una brújula tipo brunton.

Un criterio excluyente, que se toma en consideración para el caso del cálculo del RQD sin sondeo, en caso de presentarse un suelo de tipo coluvial, aluvial, residual, en general denominado genéricamente como material cuaternario etc., dentro de la zona de toma de muestras, se debe tener en cuenta que estos materiales no se consideran para el cálculo RQD.

Figura 6

Flujograma de evaluación del RQD



Fuente: elaboración propia

2.1.13 Limitaciones del RQD y de la estimación sin sondeo

El RQD conserva el umbral de 10 cm de la definición original; por tanto, los fragmentos menores no suman al porcentaje. La estimación superficial mediante Línea de Detalle (Detail Line) es, además, sensible a la orientación del trazo respecto a las familias de discontinuidades. Estas condiciones pueden inducir sesgos si no se controlan. Para mitigarlos se recurre a sectorización del talud, múltiples líneas de detalle, verificación de longitudes efectivas y tratamiento estadístico de los datos. Asimismo, el RQD no incorpora rugosidad, alteración, rellenos ni presencia de agua, variables que quedan fuera del alcance del indicador y se declaran explícitamente como limitaciones del estudio.

2.1.13.1 Umbral de 10 cm

El RQD contabiliza únicamente los fragmentos ≥ 10 cm a lo largo del eje del testigo (o su equivalente en estimación superficial). Esto implica:

- Efecto umbral: si la masa rocosa genera numerosos fragmentos < 10 cm, el RQD tiende a 0% aunque la roca pueda mostrar tramos con piezas cercanas al umbral. A la inversa, una secuencia de fragmentos apenas > 10 cm puede elevar el RQD sin reflejar necesariamente una buena condición estructural.
- Insensibilidad a la calidad de juntas: el indicador no evalúa rugosidad, alteración, apertura ni relleno; solo refleja tamaño/continuidad de fragmentos.
- Escala y representatividad: el valor depende de la longitud efectiva muestreada. Longitudes cortas o discontinuidades muy localizadas aumentan la variabilidad del RQD.

Criterios de mitigación (aplicados en el estudio):

- a. Usar líneas de detalle con longitud suficiente por sector, evitando tramos muy cortos;
- b. Reportar estadísticos (promedio, valor más probable y dispersión) en vez de un único valor;

- c. Acompañar el %RQD con frecuencia y espaciamiento observados para contextualizar el efecto del umbral.

2.1.13.2 Sensibilidad a la orientación del scanline

El número de intersecciones entre discontinuidades y la línea de detalle depende del ángulo entre el scanline y los planos de las familias. Cuando la línea es casi paralela a una familia, subcontabiliza intersecciones (espaciamientos aparentes mayores) y puede sobreestimar el RQD; cuando es casi perpendicular, sobrecontabiliza intersecciones (espaciamientos aparentes menores) y puede subestimar el RQD.

- Para una familia dominante, el espaciamiento “verdadero” S_t y el “medido” S_m se relacionan, de forma aproximada, por:
$$S_t \approx S_m \cdot \sin(\alpha)$$
, donde α es el ángulo entre el scanline y la traza de la familia en el talud. Ángulos pequeños $\Rightarrow \sin(\alpha)$ pequeño $\Rightarrow$ riesgo de sesgo.
- En macizos con múltiples familias, un único trazo puede ser representativo para unas y sesgado para otras.

Criterios de mitigación (aplicados en el estudio):

- a. Sectorización del talud y uso de múltiples líneas con trazos controlados.
- b. Verificación de horizonte y alineación del scanline para reducir error geométrico.
- c. Apoyo en estereografía (DIPS) para identificar sets y revisar la idoneidad de las orientaciones de muestreo.
- d. Reporte por sector (no solo global) para disminuir el efecto de familias mal muestreadas.

2.1.14 Las discontinuidades rocosas

Las discontinuidades se definen como cualquiera de los planos de origen mecánico o sedimentario que separa los bloques de matriz rocosa de un macizo. Estas pueden ser desde fisuras sin desplazamiento entre sus caras o separadas por cm o metros, su origen es de tipo

mecánico por los esfuerzos inducidos en el macizo y en algunos caos de carácter térmico, Usualmente, la resistencia a la tracción de estos planos es muy baja o nula. dependiendo fundamentalmente del tipo de agente cementante existente o no.

Su comportamiento mecánico queda caracterizado por la resistencia al corte que posee su material de relleno (Barton, 1978, p. 45).

Según refiere Cañapataña (2019), la separación entre fracturas de discontinuidades que está asociado como es lógico al tamaño de las rocas (tamaño de bloques) estos influenciaran en la infiltración en el macizo que se manifiesta a través de la permeabilidad y nivel fracturas, las que hacen de ductos para el desplazamiento del agua.

Según la Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía (2014), el parámetro de fracturación es importante para establecer la calidad del macizo rocoso a través de una escala de medida propuesta de Hoek – Brown; pudiéndose aplicar para macizos rocosos sin fracturas o fracturados, y con distintas direcciones, las fracturas se pueden correlacionar en la calificación del macizo rocoso.

Tabla2

Relación del espaciado de fracturas y el tipo de macizo rocoso

Descripción	Espacio de las juntas	Tipo de macizo rocoso
Muy ancho	> 3 m	Sólido
Ancho	1 – 3 m	Masivo
Moderado cerrado	0.3 – 1 m	Bloques
Cerrado	50 – 300 mm	Fracturado
Muy cerrado	< 50 mm	Molido

Nota: Reproducida de Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, por Bieniawski (1989).

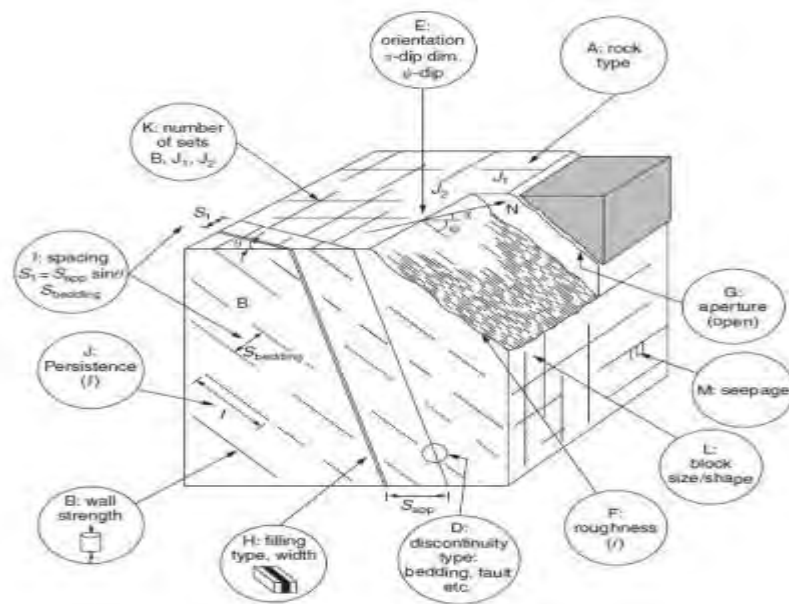
Fuente: elaboración propia

Según la información, el tipo del macizo rocoso se establece a través del índice sólido, masivo, bloques, fracturado y molido; (**Tabla 2**), que se encuentran dentro del rango de espaciado de juntas de > 3 m y menores a < 50 mm; que son parámetros que se obtienen por

muestreo de taludes, en la (**Figura 7**), se observa el tipo de fracturamiento rocoso que se ubica en el “área de estudio”.

Figura7

Gráfico esquemático de las principales características de las discontinuidades y su presentación tridimensional

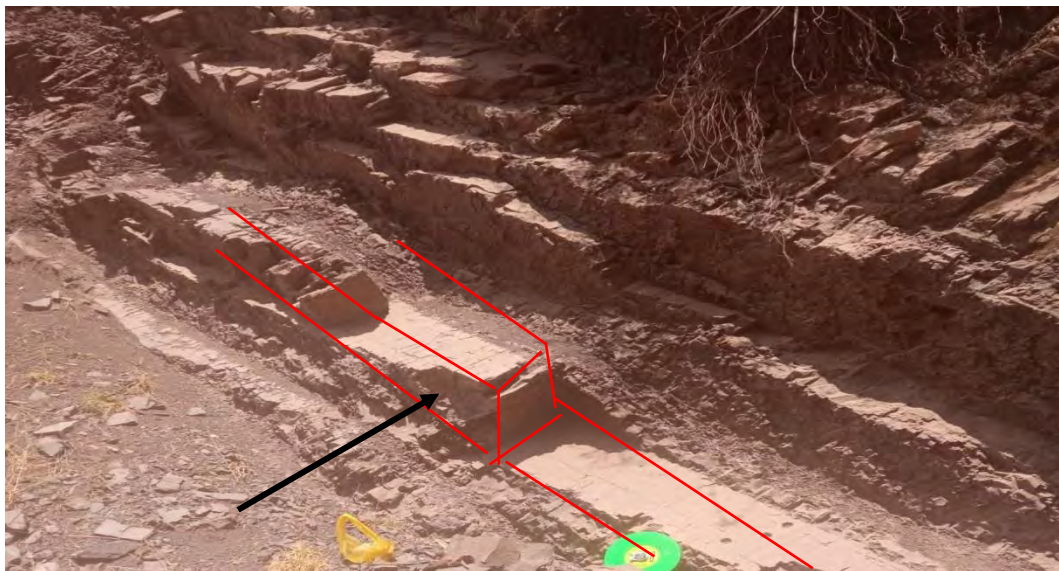


Nota: Esquema de propiedades de las discontinuidades en tres dimensiones (Willye, 1999)

Fuente: Willye, 1999

Figura 8

Fracturación del macizo rocoso tramo San Jerónimo – Paruro km 12



Nota: Detalle de las líneas rojas, muestra el nivel de fracturamiento.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.15 Métodos de clasificación en zonas rocosas

La información consultada presenta diferentes criterios en el proceso de clasificación, planteadas desde diferentes ópticas; a partir del cual se establece la metodología que permitió evaluar y categorizar el macizo rocoso.

La necesidad de determinar el criterio que permita identificar la metodología más fiable y a partir de ella poder establecer las equivalencias para obtener resultados confiables; para lo cual se considera el método de índole descriptivo de Terzaghi (1965), que señala las diferentes separaciones de discontinuidades y correlacionarlas con un tipo cualitativo.

Tabla3

Valores considerados para espaciamiento de fracturas

Descripción	Espacios(mm)
Espacios extremadamente estrechos	< 20
Espacios muy reducidos	20 - 60
Espacios reducidos	60 - 200
Espacios moderados	200 - 600
Amplio espacio	600 - 2000
Espacios muy amplios	2000 - 6000
Espacios extremadamente amplios	> 6000

Nota: El cuadro de Terzagui (1965); muestra la descripción cualitativa y cuantitativa de discontinuidades en masas de rocas. *Fuente:* Zhang (2017).

2.1.16 RQD en ingeniería civil

La información referente a la rama profesional de ingeniería civil se utilizó para establecer la profundidad en las cimentaciones en roca, capacidad de carga del lecho rocoso, la capacidad de deformación y el deslizamiento, además facilita las excavaciones de túneles para poder evaluar áreas rocosas de baja calidad, la cual tiende a no auto soportarse o no soportar estructuras artificiales y también es utilizado en el diseño de pendientes de taludes en carreteras.

2.1.17 El RQD sin sondeo

El trabajo se basa en la metodología de muestreo lineal, tomando como referentes los trabajos desarrollados por Priest y Hudson (1976) que orienta el desarrollo del trabajo y que tomamos como principal fuente metodológica en el desarrollo de la investigación; Cabrera Car (2010) que refiere las propuestas metodológicas formuladas por Deere y Deere y Miller (1967) planteando un proceso para la Designación en la Calidad de Roca (RQD), sin embargo, ese criterio tomado se centra en considerar la evidencia de testigos.

De acuerdo con los criterios el RQD, se puede medir el índice significativo para la estimación de la calidad de rocosa, el cual como se indica permite establecer el porcentaje de fracturas de un macizo rocoso. Cabrera Car (2010) mencionando a Palmstrom (1982), precisa que para determinar el cálculo del RQD en lugares donde no existen testigos; se podrá considerar fragmentos por unidad de volumen; la técnica efectivamente está planteada sin embargo su aplicabilidad depende por ejemplo de la accesibilidad a las áreas de muestreo, Además, Hoek (1998) y otros plantean el índice geológico de resistencia (GSI), que si mencionar necesariamente el RQD, este puede ser correlacionado de requerirse.

Según Ramirez Oyanguren & Alejano Monje (2004) en el RQD, se deben de tener cuidado, al no solo considerar el macizo también aspectos operativos de la misma perforación, orientación y hasta diámetro, considerando que se utilizara la técnica primigenia para su estimación, en el caso del RQD, sin sondeo estos aspectos están descartados en su mayoría

Para Seguret y Guajardo (2015) de manera similar a Ramirez y Alejano, también se deberá considerar la orientación por el tema de direccionalidad en el caso casi paralelismo de muestra y línea de muestreo.

El RQD del estudio sin sondeo, se centra en calcular el número de fracturas por metro, establecidos a partir del trabajo de levantamiento y toma de muestras mediante la técnica de “Detail line”; formulada por (Priest & Hudson, 1976). Con el cual se estima el valor cuantitativo y calificación cualitativa del macizo rocoso.

2.1.18 Tipos de discontinuidades.

Chambi Tapahuasco (2015) señala cuatro tipos que definen las roturas (fracturas), y en las que tiene participación la calidad del macizo rocoso que son: “rotura planar, cuña, por vuelco de estratos y circular”; tomando en cuenta la clasificación planteada por Bieniawski y considerando la nomenclatura establecida en el RMR

2.1.19 Tipos de Fracturas.

Bordehore (2008) señala que, depende cómo las discontinuidades o características estructurales que presente en el macizo rocoso, el cual determinará el comportamiento de las estructuras. Dentro de ella, se encuentran los tipos discontinuidades de masa de roca:

Planos de estratificación: son aquellas que muestran más que fracturas líneas de contacto y debilitamiento se dan partir de estratos en las masas rocosas.

Fallas: discontinuidades que originan desplazamientos de rocas fracturas o paralelos al plano o formando ángulos con el plano de falla. Son estructuras de diversa dimensión que en algunos casos pueden ser de kilómetros siendo regionales.

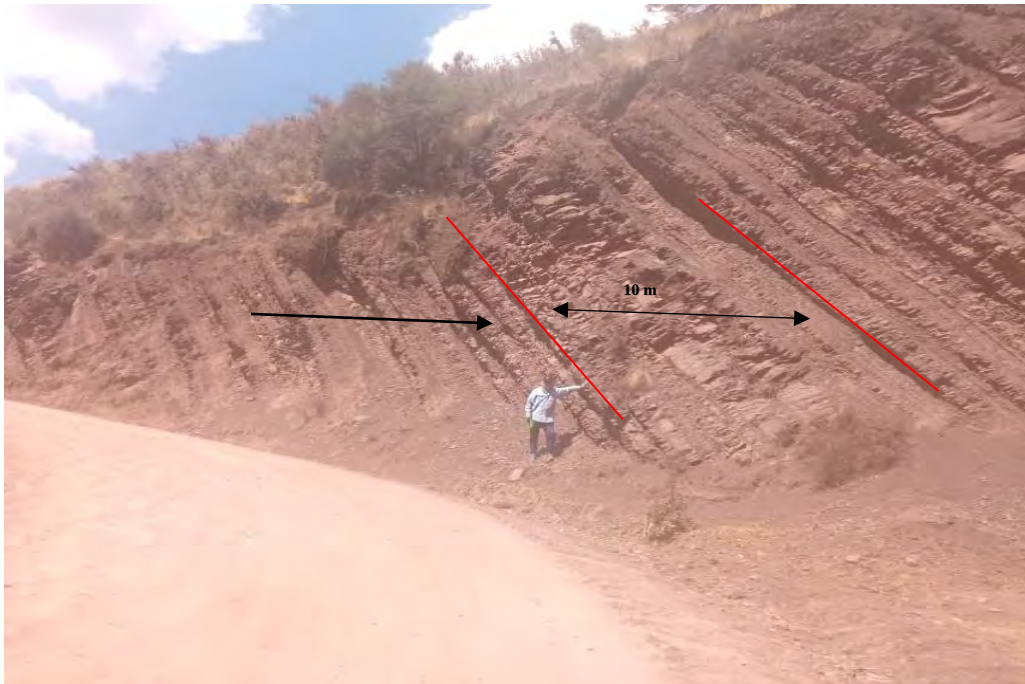
Zonas de contacto: son sectores de material de diferente tipo y se miden en metros de grosor.

Diaclasas: Las discontinuidades no presentan desplazamientos y pueden tener tendencias grupales que se tienen que identificar son las más comunes en los macizos de roca.

Planos de Esquistosidad: se presentan en las capas de rocas producto de la acción dinámica del ambiente, cuya forma se presenta a manera de láminas

Figura 9

Toma de muestras de la medida de discontinuidad del macizo rocoso en el tramo San Jerónimo – Paruro km 12



Nota: Detalle de discontinuidad en las rocas y plano de estratificación de rocas en el tramo.

Fuente: Elaboración Propia.

Macizo rocoso

Según Duque (2017) precisa que los macizos rocosos pueden ser competentes o no competentes y las fallas que puedan presentarse en zonas de discontinuidad del macizo, además indica que estas rocas tienen fallas que se evidencian a través del macizo rocoso y de sus defectos estructurales, por tal motivo el macizo rocoso es definido como:

Macizo rocoso= Matriz rocosa + discontinuidades.

La matriz rocosa está constituida por la parte sólida rocosa y se caracteriza por sus propiedades intrínsecas como: resistencia al esfuerzo compresivo, resistencia al esfuerzo de tracción, peso específico, entre otras, es la responsable de las propiedades físicas del macizo.

Las discontinuidades, término utilizado para denominar de forma indistinta todo tipo de no continuidad física y fracturas en el estudio.

Juntas

Son fracturas a lo largo del bloque rocoso, Esto ocurre debido a movimientos geológicos que generaron esfuerzos superiores a su resistencia mecánica dando origen a las fracturas, en otros casos son de tipo térmico producto del enfriamiento de las rocas que se contraen las capas superficiales durante el proceso de erosión.

Diaclasas

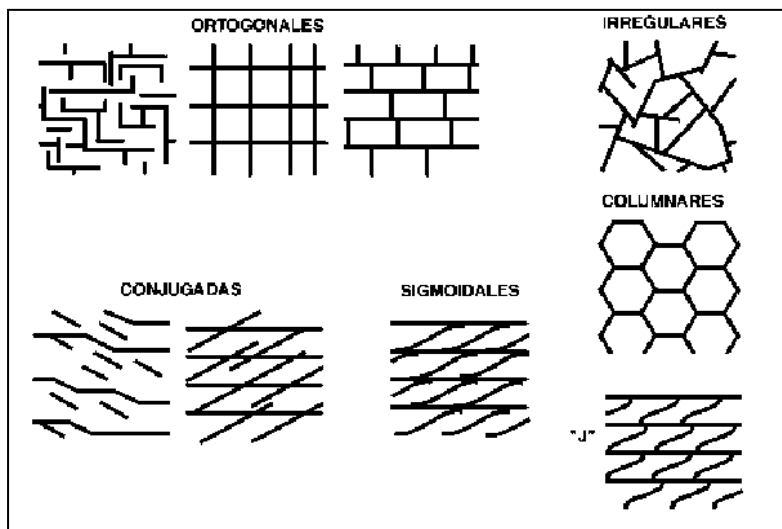
Las fisuras que se presentan sin deslizamientos relativos en su área, se forman por movimientos tensionales y de cizalla, por la dinámica generada por la corteza terrestre, Generalmente presentan una disposición paralela entre sí, aunque es muy escasa la orientación aleatoria.

Sistemas de diaclasas

Los grupos de fracturas que siguen similar patrón de Buzamiento y Dirección de buzamiento forman grupos de fracturas (Set o familias)

Figura 10

Tipos de diaclasas que presentan las rocas



Nota: La figura muestra el sistema de diaclasas (Web cit: www.ptolomeo.unam.mx:8080, 2005).

Caracterización del talud rocoso

Las características que presenta la zona, responden al análisis realizado de los diferentes procesos de medición del macizo, en el ámbito de la geotecnia, significa la identificación de aspectos geométricos-físicos que nos permitieron establecer la calidad del talud rocoso, según Jiménez et al. (2019) esta caracterización se realiza de manera minuciosa, de acuerdo a observaciones y mediciones realizadas en el sitio objeto de estudio, y parte de los mismos será tomar las características de las fracturas presentes y que en la valoración final del macizo tendrá relevancia en el comportamiento mecánicos del macizo rocoso.

Entre las principales características a considerar al mapear un macizo para propósitos de caracterizarlo se pueden mencionar:

Orientación:

Se refiere a la ubicación de la geometría de la discontinuidad en el espacio con referencia a un plano horizontal imaginario, y la máxima pendiente del plano, al que se denomina buzamiento (dip), este puede tomar valores de 0° a 90° como máximo siendo en mínimo valor un plano absolutamente horizontal y el máximo valor un plano vertical, así también la dirección de buzamiento (dip direction). Se refiere a la proyección en el plano de la línea de máxima pendiente del dip, pero esta vez respecto del norte magnético referencial siempre leído en sentido, Cuando un conjunto de fracturas tiene similar orientación, es decir valores similares del dip y dip direction, se dice que éstas forman una familia o Set de discontinuidades.

Espaciamiento:

Es la separación perpendicular entre fracturas adyacentes. Dado que la orientación de la línea de detalle (detail line), no es necesariamente perpendicular a las fracturas estas se corregirán por el ángulo de orientación de la línea; Como la cantidad de lecturas de campo son muchas, para el propósito del estudio se tomará valores promedios representativo de la zona de estudio y se cuantificará a lo largo de una wincha, de manera consecutiva.

Persistencia:

Se refiere a la longitud de afloramiento en la cara del talud de la traza de fracturas, al igual que en el espaciamiento se tomará en cuenta todas las fracturas interceptadas por la LD (Detail Line), será cuantificada utilizando un distanciómetro láser para las longitudes mayores.

Rugosidad:

Se refiere a las irregularidades observables en el plano de la fractura, no se tomará en cuenta en el presente estudio.

Apertura:

La separación entre los dos planos o caras de una fractura, no se tomará en cuenta en el estudio.

Relleno:

Los contenidos entre las fracturas de diversos materiales en general agente cementantes o no, no serán considerados dado que el estudio no busca averiguar la estabilidad del tal.

De todas estas características de las fracturas, nosotros utilizaremos la orientación respecto del horizonte buzamiento, (dip) la Orientación respecto del Norte Magnético (Dip direction), el espaciamiento y persistencia, para nuestro propósito, dado que las otras características son utilizadas para la evaluación de la clasificación del macizo rocoso y/o estabilidad de la estructura, aspecto que escapa al propósito del presente estudio.

Según Duque (2017) es una actividad que consiste en observaciones, medidas y pruebas con el fin de extraer los parámetros cuantitativos para el diseño de ingeniería; el que se desarrolla en todas las etapas del estudio, desde el inicio hasta la culminación; estableciendo como base las observaciones geológicas.

Figura 11

Propiedades geométricas del macizo rocoso a nivel de fracturamiento



Nota: Representación esquemática del proceso geológico de las discontinuidades según, Hudson J., 1989.

2.1.20 Geología general

De acuerdo con Raffino (2021), la geología, estudia científicamente a la superficie terrestre (composición y estructura), Su objetivo es comprender la composición de la estructura externa e interna y la composición física; pero también se orienta a comprender las distintas dinámicas de su evolución, desde su origen hasta la actualidad para nuestra área de estudio y para situarlo geológicamente es conveniente su tratamiento

Importancia de la geología

Capra (2016) habla de la geología, como una ciencia natural con múltiples aplicaciones, como lo podemos ver en la ingeniería civil, la sismología y también tiene múltiples usos a las otras especialidades de la ingeniería.

2.1.21 Geología en carreteras

De acuerdo con Villegas (2018) una vía terrestre como una carretera, es un cuerpo tridimensional en su totalidad irregular, que se construye en un ambiente geológico y por tal interacción es imprescindible su estudio al construir infraestructura en la misma

Además, a través del conocimiento de la geología se obtiene criterios acerca del aprovechamiento de los materiales naturales, el comportamiento de taludes en los cortes, la calidad de los instrumentos para los terraplenes y la aptitud de las rocas y suelos para la implantación de la vía.

Ubicación

El área de estudio se ubica según el “Plan de desarrollo de Cusco” (PDC, 2020) en la provincia y región Cusco, geográficamente se encuentra al Oeste de la cordillera oriental y se orienta al sur este. Está ubicado a 12 km de la vía Cusco, San Sebastián - Paruro. (PDC, 2020).

Clima

Su clima se ubica en la zona sierra, presentando diferentes climas, que va desde el clima templado hacia el sector del valle a frío en zonas de altura, que es el caso del presente estudio.

La temperatura es variable y acorde con las estaciones del año, donde en verano y primavera se presenta ausencia de lluvias, y en otoño e invierno la temperatura es baja.

La zona presenta precipitaciones variables desde los meses de diciembre a marzo, presentando características muy lluviosas.

2.1.22 Geomorfología

Según (Delgado Madera, 2011) precisa las montañas del Cusco, donde afloran las areniscas de la gran formación Kayra. Esta formación se encuentra alterada, deformada, diaclasada, como consecuencia de la tectónica regional. Su configuración del macizo rocoso es de areniscas feldespáticas, combinadas con lilitas rojas; presentando sectores de intensa erosión.

2.1.23 Cobertura del suelo

La cobertura presenta escasa a nula cobertura vegetal, cubriendo toda el área de estudio con matorrales y pastos naturales asociados con la altitud.

2.1.24 Grupo de San Jerónimo

El área motivo de estudio está comprendido dentro de una formación que es denominado “capas rojas” y cuyo grosor se estima en más de 6000 metros, como indica Córdova (1986) es de origen fluvial, aflorando ampliamente en el Cusco, se divide en dos formaciones: Kayra y Soncco.

La formación Kayra (3000 m.), está formada principalmente de rocas areniscas, con presencia de lutitas rojizas; presentando en la zona media – superior una capa densa de areniscas, mezclada con rocas sedimentarias y cuarcitas, la formación acaba con facies arenosas.

Según Carlotto (2016) la zona de San Jerónimo se divide en dos formaciones claramente definidas Kayra y Soncco, que comprende una formación mayor que se encuentra entre la altiplanicie de Cusco extendiéndose por Puno y Bolivia; sector en donde están presentes el tipo de formación de capas rojas asociados con la zona de San Jerónimo que, se encuentra contraria a la formación Chilca, Quilque, Puquín o Vilquechico ubicados dentro del (Cretácico superior). Las dataciones realizadas en trazas de fisión en apatitos, ubica una edad de ~52 Ma correspondiente al (Eoceno basal) que corresponde a la formación Kayra que caracteriza a la característica de la zona o capas rojas. Ampliando, Córdova (1986) reafirma que, la formación Soncco se encuentra constituida de lutitas rojas, intercaladas con estratos en arena fina (con mineralización de cobre) hacia la base, en cambio la zona superior se compone de rocas sedimentarias de clastos de arena y conglomerados volcánicos. En este espacio es el que se desarrolla la investigación, presenta dos espacios marcados de formación de capas rojas, los cuales están comprendidos en la formación Kayra y Soncco, que alcanzan a extenderse por el territorio sur peruano y boliviano.

Figura 12

Formación Kayra y Soncco se encuentra el tramo San Jerónimo – Paruro km 12

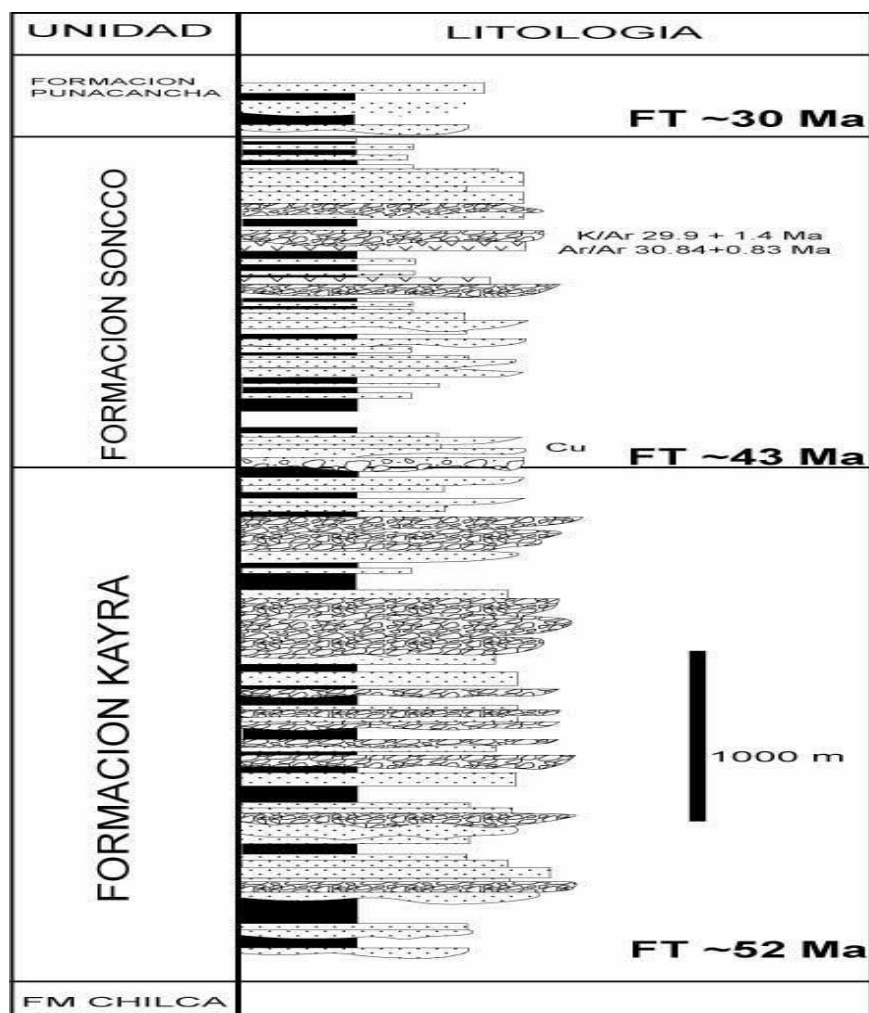


Nota: La figura presenta las características de la formación *San Jerónimo – Paruro km. 12*. **Fuente:** Carlotto (2016).

De acuerdo con lo mencionado, se puede ver que en el tramo precisado se presentan las capas rojas que, pueden claramente distinguirse en todo el trayecto que se indica, y cuya estratificación litológica se muestra en la figura 13.

Figura 13

Formación Grupo San Jerónimo (Kayra), en el tramo de estudio.



Nota: La Formación Kayra, constituida por areniscas feldespáticas, constituye las capas rojas. Fuente: Toma de muestra propia

2.1.25 Representación estereográfica

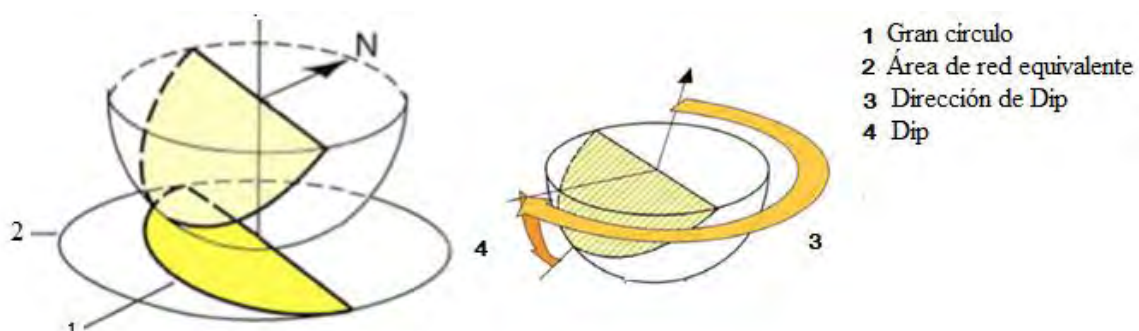
Una manera de representar una geometría de tres dimensiones en uno de dos dimensiones, es mediante el uso de la proyección estereográfica utilizando la proyección de un plano en el hemisferio inferior de una circunferencia que es atravesada por diferentes líneas las que atraviesa el centro, (fig. 16),cuyas intersecciones en un plano horizontal se representa en círculos máximos (meridianos) los que utilizan para la representación en la red de Lambert.o Schmidt según sea la necesidad, en nuestro caso se hará uso de proyección equiangular en el hemisferio inferior

2.1.26 Número de familias presentes

Las fracturas que son en realidad planos observar enmapeado son representadas por sus *9-proyecciones en el hemisferio inferior cada plano es representado por un punto (polo), en la representación estereográfica la concentración de los mismos son un indicador del nivel de fracturamiento del macizo rocoso, en el trabajo se utilizara indistintamente el termino set o familia, los que a su vez nos permitirán observar en el macizo rocoso las orientaciones preferenciales de las discontinuidades en (buzamiento y dirección de buzamiento), características que son consideradas para identificar las familias también denominadas set, las mismas tendrán una tolerancia +/- de carácter estadístico.

Figura 14

Fundamentos de Proyección Estereográfica (Proyección de Lambert)



Fuente: (Software.) *Proyección estereográfica.*

2.2 Antecedentes de la investigación

2.2.1 Antecedentes Internacionales

Alvarado (2020), en su tesis titulada “*Modelamiento geoestadístico de la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)*”, propone dos marcos probabilísticos: (i) representación continua (gaussiana) del RMR y (ii) simulación discreta de sus subíndices (RQD, UCS, espaciamiento, condición de juntas, agua, orientación). Demuestra que el enfoque geoestadístico permite generar mapas de probabilidad, clase y cuantificar la incertidumbre espacial, y que la simulación discreta preserva la naturaleza categórica de los componentes, evitando artefactos de promediación en contextos con muestreo heterogéneo.

En relación al trabajo desarrollado, aun cuando el foco es el RQD estimado en superficie, los planteamientos de Alvarado son directamente transferibles, ya que respaldan la sectorización por tramos del talud mediante interpolación o simulación de indicadores derivados de scanlines, aportan un marco para expresar incertidumbre del RQD por variaciones de orientación y espaciamiento, finalmente refuerzan la pertinencia de reportar estadísticos por sector (promedio, moda/valor más probable y dispersión) tal como se propone en los criterios de mitigación y análisis.

García (2023), en su tesis doctoral titulada “*Estudio y aplicación de la técnica fotogramétrica Structure from Motion para la resolución de problemas geotécnicos*”, desarrolla un flujo SfM–MVS para reconstrucciones 3D de alta resolución en macizos rocosos, a partir del cual extrae parámetros estructurales (orientación, espaciamiento, extensión de traza y rugosidad) con control de sesgos frente a levantamientos convencionales. Valida el método con comparativas cuantitativas, mostrando que la fotogrametría reduce tiempos de campo, mejora la repetibilidad y habilita una cartografía estructural más densa para soportar la sectorización geomecánica de taludes y excavaciones.

En lo que respecta al estudio desarrollado se apoya en mediciones superficiales (scanlines) para estimar RQD sin sondeo en un talud carretero. Los resultados de García Luna sustentan, desde la instrumentación y la geometría, que la caracterización estructural en superficie puede hacerse con alta fidelidad espacial y trazabilidad, fortaleciendo la validez de estimar indicadores derivados (como RQD) sin testigos. Además, su énfasis en sectorización y control de sesgos geométricos es coherente con tus medidas de mitigación (múltiples líneas, verificación de horizontes y tratamiento estadístico).

2.2.2 Antecedentes Nacionales

El trabajo de Mamani (2023), “Evaluación geomecánica en niveles Mina 9–10” En esta tesis se estima el RQD a partir de la frecuencia lineal de discontinuidades (λ) empleando la correlación de Priest & Hudson ($RQD = 100 e^{(-0.1\lambda)} (.1\lambda+1)$), sin depender del testigo de perforación. El trabajo presenta el cálculo explícito de λ como número de discontinuidades por metro y reporta tablas comparativas por estaciones geomecánicas, con calificaciones que fluctúan de “mala” a “media” según el rango de RQD obtenido ($\approx 45\text{--}66\%$), lo que evidencia el grado de fracturamiento y su variabilidad litológica entre hornfels, magnetita y andesitas en distintos niveles de mina. Esta formulación y su reporte por estaciones constituyen un marco metodológico directo para caracterizar macizos fracturados con datos de campo estructurales y conteo de intersecciones sobre líneas de muestreo.

Aunque el contexto de Mamani es subterráneo (niveles de mina) y el mío es un corte vial, el núcleo metodológico coincide: estimación indirecta de RQD “sin sondeo” a partir de λ medido en superficie del macizo, con registros por estaciones, sectores y calificación cualitativa de la roca. Esto respalda la elección del scanline y el uso de la ecuación de Priest & Hudson para el talud arenisco del tramo San Jerónimo–Paruro, así como la presentación de resultados por tramos y la sectorización geomecánica del corte.

Collazos (2024) en su tesis titulada *“Estudio de la estabilidad del macizo rocoso, medidas de mejora y protección del Cerro Colorado de la provincia de Bagua, departamento de Amazonas – 2022”*, evalúa la estabilidad de laderas rocosas mediante reconocimiento estructural, clasificación geomecánica (RMR/Q) y modelación de inestabilidades superficiales (rockfall), para proponer medidas de protección y sostenimiento. El trabajo integra la caracterización de discontinuidades (familias, espaciamiento y persistencia) con criterios de diseño de obras de mitigación, articulando diagnóstico geomecánico con toma de decisiones de ingeniería.

Este antecedente refuerza la idea de que la caracterización estructural del talud (no solo el RQD) debe alimentar decisiones prácticas en infraestructura vial (sectorización, sostenimientos, y priorización de intervenciones). La estimación de RQD por Detail Line puede servir como indicador de fracturamiento de base dentro del mismo esquema que Collazo articula con RMR/Q y análisis de riesgo; es decir, el indicador se integra como insumo objetivo para justificar medidas de manejo del talud carretero.

2.2.3 Antecedentes Locales

En la tesis de posgrado de Balladares Pacco (2025), *Factores de inestabilidad de taludes en laderas montañosas complejas y medidas de estabilización: APV El Bosque–Puquín, Cusco*, se identifican y jerarquizan condicionantes internos (litología, nivel freático, configuración geomorfológica) y externos (precipitación, intervención antrópica) que gobiernan la inestabilidad de laderas urbanas en Cusco. El estudio sustenta su diagnóstico con mapeo detallado y ensayos de laboratorio (por ejemplo, corte directo bajo normativa NTP/ASTM), y propone medidas de estabilización tanto estructurales como no estructurales para el ámbito evaluado.

Aunque mi foco específico es el talud rocoso vial y la estimación superficial del RQD mediante Detail Line, tomo este antecedente porque me enmarca el comportamiento del talud en contexto andino y refuerza la necesidad de sectorizar y priorizar intervenciones. En mi caso, la caracterización de discontinuidades (familias, espaciamiento, persistencia y buzamiento) y el %RQD me dan una métrica objetiva del grado de fracturamiento que complementa la lógica de diagnóstico de Balladares: con esa base, puedo traducir la condición estructural del macizo en criterios operativos para gestión y mantenimiento del talud en infraestructura vial.

CAPITULO III.

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

De acuerdo con la información que se tiene la investigación según precisa Ñaupas et al. (2014) plantea que, la hipótesis propone respuestas tentativas a preguntas descriptivas. Son supuestos sobre la naturaleza, clase, estructura y función de un fenómeno o proceso. En ese sentido señala que la hipótesis es un supuesto de respuesta o descripción a diferentes problemas planteados, donde a través del proceso explicativo plantea posibles soluciones al problema en base a conocimientos previos.

Bajo esta premisa se precisan las siguientes hipótesis:

3.2 Hipótesis General

Existe una correlación lineal inversa y significativa entre la frecuencia y el espaciamiento de fracturas y el %RQD estimado sin sondeo en la carretera San Jerónimo – Paruro km 12.

3.2.1 Hipótesis Específicas

- La orientación y la inclinación de las fracturas presentan patrones predominantes por sector que evidencian heterogeneidad estructural en la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12.
- El %RQD estimado sin sondeo presenta diferencias significativas entre sectores y una distribución espacial no uniforme a lo largo del tramo.
- La densidad y la frecuencia de fracturas están asociadas con el %RQD estimado sin sondeo en la carretera San Jerónimo – Paruro km 12.

3.3 Identificación de variables e indicadores

Según Ñaupas et al. (2014) las variables son particularidades, cualidades observables de personas, cosas e instituciones, que manifiestan cantidades discretas o en continuo cambio.

De acuerdo con esta definición se puede identificar las siguientes variables del estudio:

3.3.1 Variable Independiente

- Estructura de fracturamiento del macizo.

Dimensiones:

- Frecuencia de fracturas (ff/m)
- Espaciamiento medio de fracturas (m)

3.3.2 Variable Dependiente

- RQD (%) estimado sin sondeo.

Definición operacional: Porcentaje de RQD calculado a partir de conteos de fracturas medidos sobre Detail Line, según el enfoque de Priest & Hudson

Dimensiones:

- Magnitud del RQD
- Estadísticos representativos
- Distribución Espacial del RQD
- Designación (categoría) RQD

3.4 Operacionalización de variables

Wigodski (2010) señala en este punto, que son todas aquellas que representan conceptos importantes que se interrelacionan en el diseño de investigación. Creando conceptos que generan ideas particulares conducentes a llegar a la hipótesis planteada.

Tabla4

Matriz de Operacionalización de Variables

Matriz de Operacionalización de Variables.

Variable	Dimensiones	Indicadores	Definición Operacional	Técnica de Recolección	Instrumentos	Unidad
V.I. Estructura de fracturamiento del macizo rocoso	Geometría de las discontinuidades	• Frecuencia de fracturas (ff/m)	Cuantificación física de los planos de discontinuidad en el talud mediante el conteo y medición de distancias consecutivas a lo largo de una línea de muestreo.	Línea de detalle (<i>Scanline survey</i>)	Wincha o cinta métrica, distanciómetro láser	• $1/m$
		• Espaciamiento medio (S)				• m
	Orientación espacial	• Rumbo (Azimut)	Determinación de la disposición espacial y actitud geológica (dirección e inclinación) de las familias de discontinuidades respecto al norte magnético.	Medición directa en estación estructural	Brújula geológica (tipo Brunton) con clinómetro	Grados ($^{\circ}$)
		• Buzamiento				
V.D. Calidad de roca (RQD) estimado sin sondeo	Estimación analítica del RQD (<i>Responde a "estimar"</i>)	Porcentaje de RQD ($\%RQD$) por estación/sector	Estimación matemática indirecta del índice de calidad de la roca (RQD) en el talud a partir de los datos de espaciamiento y frecuencia de fracturas usando el	Procesamiento analítico de gabinete	Formatos de cálculo en planilla Excel	Porcentaje (%)

Variable	Dimensiones	Indicadores	Definición Operacional	Técnica de Recolección	Instrumentos	Unidad
			enfoque de Priest y Hudson.			
	Distribución espacial del RQD (<i>Responde a "cartografiar"</i>)	• Parámetros estadísticos descriptivos • Mapa de distribución de %RQD	Evaluación del comportamiento estadístico y representación cartográfica de la variación de la calidad de la roca a lo largo del Km 12 de la carretera.	Modelamiento geoespacial y procesamiento estadístico	Software SIG (ArcGIS/QGIS), SPSS v25 y Excel	• %, según parámetro • Adimensional
	Designación de la Calidad de Roca (<i>Responde a "designación de calidad"</i>)	Categorías de la clase RQD (Excelente, Buena, Regular, Pobre, Muy Pobre)	Clasificación e interpretación geotécnica del macizo rocoso mediante la asignación de categorías cualitativas en función a los rangos estándar del %RQD obtenido.	Análisis comparativo normativo	Tabla de clasificación de Deere (1964) / Planilla Excel	Cualitativo (Categoría)

Nota: Cuadro de variables prouestas.

Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO IV.

METODOLOGÍA

Según Cartaya Pire (2006) plantea que la caracterización geomecánica de los macizos rocosos tiene el objetivo de evaluar la calidad de este, con la finalidad de evaluar su estabilidad y seguridad en excavaciones, por eso la importancia del estudio de los macizos rocosos, que permitan conocer sus características y comportamiento posterior.

Además, agrega Cartaya Pire (2006) que una parte significativa también, son las clasificaciones geomecánicas, que permiten alcanzar parámetros de observación y datos observacionales de manera íntegra en la evaluación de medidas de estabilidad; permitiendo evaluar el comportamiento geomecánica de los macizos rocosos.

La metodología aplicada para el trabajo se centra en muestrear, describir y analizar las fracturas halladas a través las (Detail Line), en el talud rocoso planteado. San Jerónimo – Paruro km. 12; tomando como indicador el RQD, (no necesariamente la calificación del macizo), para este propósito, tomando en consideración que se realizó la identificación in situ del grado de fracturamiento de la formación litológica en la que se emplaza el talud motivo de estudio.

Las diferentes muestras fueron extraídas del macizo rocoso en tres sitios de interés (áreas de mapeo seleccionadas), que además son consecutivas de tal manera que el mapeo sea exhaustivo a lo largo de todas las líneas de detalle, que permitieron desarrollar la medición y determinación de las características identificadas para lograr el objetivo final. El procesamiento se desarrolla en el apoyo de los softwares Dips, Statgraphics, Fastfit, lo que permitió establecer el índice de calidad del macizo rocoso. Toda esta información generada permitió desarrollar los diferentes cuadros y gráficos para la estimación más probable del RQD, que es el objetivo de la investigación. El trabajo se desarrolló, de manera cuidadosa tomando en consideración las etapas principales, campo, en gabinete, y sistematización de la información.

4.1 Ámbito de estudio: localización política y geográfica

La carretera San Jerónimo – Paruro km.12, se ubica en una zona de abundantes precipitaciones que se presentan entre los meses diciembre a abril; la cual genera inestabilidades locales de taludes y deslizamientos de los cortes de talud.

4.2 Localización política.

Figura15
localización política



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Tipo y nivel de investigación

4.3.1 Tipo de investigación

Según Carrasco Diaz (2019) “se trata de ampliar y profundizar lo conocido existente para mejorarlo. La investigación aplica los conocimientos teóricos a aspectos prácticos, es decir, teorías que las analizan para mejorar su contenido”.

En ese entender las características de la investigación propuesta, el estudio de enfoque cuantitativo y diseño no experimental, de corte transversal. Se realiza observación directa y medición sistemática de parámetros estructurales en el talud (frecuencia lineal de fracturas, espaciamiento y persistencia) para estimar el RQD sin sondeo mediante líneas de detalle y analizar su distribución espacial en el macizo rocoso del tramo evaluado. No se manipulan variables; las mediciones se ejecutan sobre el estado actual del afloramiento.

4.3.2 Nivel de Investigación

El nivel adoptado es descriptivo, correlacional y explicativo. El objetivo es caracterizar el fracturamiento, estimar el RQD sin sondeo y explicar su variación espacial a partir de relaciones empíricas entre los parámetros estructurales medidos en el talud.

Primero se realiza la caracterización estructural del macizo mediante mapeo sistemático en líneas de detalle, identificando familias de discontinuidades y midiendo rumbo, buzamiento, espaciamientos y persistencia. Con esas lecturas se calcula el RQD por estación y por sector, se construyen perfiles longitudinales del indicador y se resume la tendencia y la dispersión con estadísticos robustos.

Después se examinan las asociaciones entre la intensidad de fracturamiento, expresada por la frecuencia lineal y el espaciamiento, y el porcentaje de RQD. Se emplean coeficientes de correlación, pruebas de significancia y, cuando corresponde, ajustes funcionales simples. Finalmente se interpreta cómo la densidad y la geometría de las discontinuidades condicionan

los valores del RQD y su distribución, incorporando consideraciones sobre orientación de líneas de muestreo y el umbral de diez centímetros para depurar sesgos.

4.4 Unidad de análisis

El trabajo de investigación se centra en análisis del macizo rocoso aflorante en el talud carretero de la zona San Jerónimo – Paruro km. 12, donde se realizó el registro y medición a mano y formato específicamente desarrollado para el caso, usando como medio la determinación de la orientación con la brújula tipo brunton para medir en el área el: el buzamiento, y dirección de buzamiento de las fracturas, en tres tramos con una longitud total de 149.5 m., además midiendo la longitud de la traza de fracturas(persistencia), con el apoyo de un distanciómetro láser de mano, lográndose la toma de las muestras, los que también permitió ver a detalle cada fractura, utilizando la técnica de línea de detalle o “detail line”, que permitió levantar de manera exhaustiva cada intercepción con la línea de referencia.

Todo el proceso, nos permitió identificar las unidades de muestreo, que se utilizó en el cálculo y análisis del macizo rocoso, considerando un criterio metodológico para una adecuada toma de muestras desarrollado en campo:

Tabla5
Caracterización y descripción en campo del macizo rocoso

Ámbito de estudio	Características o propiedades	Método	Clasificación
Discontinuidades	Orientación	Medida directa con brújula de geólogo	Índices y clasificaciones estándar
	Espaciado Continuidad	Medidas de campo	
	Rugosidad	Observaciones y medidas de campo	Comparación con perfiles estándar
	Resistencia de las Paredes	Martillo de Schmidt. Índices de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia

	Abertura Relleno Filtraciones	Observaciones y medidas de campo	Índices estándar
Macizo rocoso	Número de familias de discontinuidades	Medidas de campo	Índices estándar
	Tamaño de bloque		
	Intensidad de fracturación		
	Grado de meteorización	Observaciones de campo	Clasificaciones estándar

Nota: Tomado de análisis de campo de González de Vallejo (2004)

4.5 Dominio de estudio

El trabajo toma como universo todas las fracturas que se encuentra en el tramo de estudio a lo largo de los 149.5 m y a lo largo de la altura variable de (5 a 14); m de altura en el talud carretero del tramo que comprende San Jerónimo – Paruro km. 12 +149.5 m, de la región de Cusco.

4.6 Población de estudio

Se tomó como población todas las discontinuidades en este caso las fracturas que se encuentran en los tres sectores de muestreo sector 01, sector 02, sector 03, que fueron interceptados por la línea de muestreo a lo largo del área de estudio en los 149.5 m en la zona del talud carretero del tramo que comprende San Jerónimo – Paruro km. 12 de la región de Cusco.

4.7 Tamaño de muestra

El talud rocoso se ubica en el lado derecho, (asumiendo desplazamiento Cusco-Paruro), en el km. 12 de la vía que articula al distrito de San Jerónimo con la vía que, de la provincia de Paruro, cuya área de muestreo comprende 03, sectores (sector 01, sector 02, sector 03), con un total de 149.5 metros lineales y puntos de muestra tomada.

Para la investigación se realizó la medición de las fracturas del talud, se consideran todas las fracturas que son interceptadas por la línea de muestreo, luego de extender la wincha de forma horizontal, tomando un total de 900 valores, (Buzamiento, Dirección de Buzamiento,

Separación entre fracturas y Persistencia), a partir de los cuales se obtuvo la información necesaria para el análisis y desarrollo descriptivo del sitio a través de la aplicación de cálculo del RQD.

Tabla 6

Sectores de muestreo y características de las líneas de muestreo

Sector de Muestreo	Longitud (m)	Numero de Muestras	Orientación (°)	Inclinación (°)
Sector 01	49.5	284	S73W	0
Sector 02	50	212	N89W	0
Sector 03	50	404	N11E	0

Fuente: Elaboración Propia

- Criterios de inclusión (implícitos al scanline): todas las fracturas visibles en el paramento del talud y efectivamente interceptadas por la línea de muestreo en cada sector.
- Criterios de exclusión: discontinuidades no aflorantes o no interceptadas por la línea (fuera del marco observable).

4.8 Técnicas de selección de muestra

La selección muestral partió de la delimitación in situ de los tramos del talud en el sector San Jerónimo–Paruro km 12, priorizando ventanas con afloramiento rocoso limpio, mínima cobertura coluvial/vegetal y accesibilidad segura. La unidad básica de muestreo fue la línea de detalle (scanline) tendida sobre la cara del talud. Se adoptó un muestreo probabilístico estratificado, donde los estratos se definieron por orientación dominante de las familias de discontinuidades y por morfología local del corte (variaciones de altura/inclinación). En cada estrato se fijó un número de líneas con longitud efectiva suficiente para capturar la variabilidad interna y reducir error de muestreo.

La ubicación final de las líneas se determinó en campo, verificando: (i) continuidad de exposición, (ii) representatividad litológico-estructural y (iii) ausencia de materiales

cuaternarios que sesguen el conteo. La estratificación por orientación permite comparar λ (frecuencia lineal), S (espaciamiento) y %RQD entre grupos estructurales, y sustenta la sectorización geomecánica del tramo.

Técnicas de recolección de información

Las técnicas del trabajo en la investigación, comprende los siguientes puntos:

Ubicación área estudio

Se realizó reconocimiento previo con cartografía base y ortoimágenes públicas (uso exclusivo de gabinete para planificación y accesos), sin emplear procesamiento fotogramétrico ni restitución 3D. Esta revisión sirvió únicamente para preseleccionar zonas potenciales; la validación y selección definitiva se hizo en campo, de acuerdo con los criterios de exposición, seguridad y representatividad.

Reconocimiento del macizo rocoso

En sitio se midieron las dimensiones operativas del talud y se verificó la continuidad del corte. Con base en la geología local y la traza de las familias de discontinuidades observadas, se definieron estaciones y líneas de detalle por estrato. Se elaboraron croquis referenciados a hitos simples (PK, cunetas, estribos) para asegurar la trazabilidad de las mediciones (Ver Figura 15, 16 y 17).

Trabajo de Campo

La base de datos de campo se depuró y sistematizó en gabinete. Se calcularon λ y S por estación/sector y se estimó el RQD sin sondeo mediante la formulación de Priest & Hudson. Para la estructura de discontinuidades se empleó DIPS (polos/planos, rosetas y densidades); para la relación λ -S-%RQD se aplicó estadística inferencial en SPSS v25 (correlaciones y ajustes funcionales), generando perfiles y mapas de distribución del indicador a lo largo del talud.

Análisis de imagen de satélite

El uso de Google Earth y ortoimágenes públicas se restringió a reconocimiento y logística (accesos, verificación de exposición y continuidad del talud). No se utilizaron estas imágenes para medir parámetros estructurales ni para modelado geométrico; las variables objetivo del estudio (λ , S y %RQD) requieren medición directa sobre el afloramiento, conforme al diseño no experimental, transversal y de enfoque cuantitativo de esta investigación. Las técnicas avanzadas de drones/fotogrametría 3D se reconocen como línea futura para monitoreo y gestión vial, pero exceden el alcance de este trabajo, centrado en la caracterización estructural superficial y la estimación del RQD mediante líneas de detalle.

4.9 Técnicas de análisis e interpretación de la información

De acuerdo con el proceso metodológico, se procedió a delimitar la extensión y ubicar el afloramiento rocoso observado en campo. Estableciendo la relación existente entre las observaciones sobre el afloramiento de Google Earth con la observación in situ (Ver Figura 10 y 11). Con el fin de establecer las características del muestreo para el análisis e interpretación del estudio; luego del cual se ingresó al software Excel para sistematizar la información. Luego se procedió con el uso del software Dips, lo cual nos permite determinar las diferentes metodologías planteadas por los autores para establecer adecuadamente la investigación y discretizar el macizo rocoso. a través de gráficos estereográficos, También para la identificación de las funciones de distribución probabilística (FDP), se realizó pruebas de validez o hipótesis, se usó el SPSS v25, Statgraphics, Xlstat y Jasp.

La determinación del RQD esencialmente permite establecer el criterio de buena, mala o pobre, calidad de la roca el que se expresa en porcentaje, con su correspondiente calificación cualitativa, dentro del rango desarrollado por (Deere), tomando como referente el Dip con respecto a la orientación norte y considerando la orientación de la inclinación (Dip- dir) y

además de considerar cada una de las fallas y diaclasas; nos permitirán determinar el RQD del macizo rocoso.

Figura 16

Vista del sector, con presencia de rocas de capas rojas



Nota: Detalle de las características de campo del tramo comprendido entre San Jerónimo y Paruro km 12 Fuente:

Toma propia

Figura 17

Vista de afloramiento rocoso disperso en el sector



Nota: Detalle de la formación irregular dentro del área de estudio comprendido entre San Jerónimo y Paruro km

12. Fuente: Toma propia

Figura18
Vía San Jerónimo – Paruro km. 12



Nota: Detalle de las características del corte talud en el tramo propuesto. Fuente: Toma propia

Figura 19

Corte talud donde se evidencia la presencia del talud, zona



Nota: Evidencia de la característica del corte talud en el tramo propuesto. Fuente: Toma propia.

Figura 20

Corte talud, se evidencia la presencia de las capas rojas, zona 2



Nota: Evidencia de la característica del corte talud en el tramo propuesto. Fuente: Toma propia.

Fuente: Elaboración Propia

Figura 21

Corte talud donde se evidencia la presencia de las capas rojas, zona 3



Nota: Evidencia de la característica del corte talud en el tramo propuesto. **Fuente:** Toma Propia.

Dentro del estudio, se desarrolla un riguroso registro y sistematización en la proyección estereográfica a partir de los polos del mismo dominio estructural y también de acuerdo con el ángulo que forma la dirección del estereograma, para lo cual se considera el método propuesto por Terzaghi (1946), que precisa la importancia de tomar medidas de las fracturas paralelas a las orientaciones donde toman la data de puntos muestrales.

CAPITULO V.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Procesamiento, análisis, interpretación y discusión de resultados.

5.1.1 Procesamiento

En el procesamiento de datos de campo que previamente se recogieron, para establecer la orientación direccional del dip y dip dirección en las fracturas, tomando como metodología como ya se mencionó, para el estudio el procedimiento de línea de detalle (Detail Line), en cada uno de los taludes; la medición lineal fue en orden correlativo entre fractura y fractura para evitar errores por acumulación, esta esta expresada en metros, y tiene una precisión al centímetro, las distancias acumuladas además nos permiten determinar la separación entre fracturas contiguas para cada punto de fracturamiento; todos los datos obtenidos en campo fueron introducidos en un cuadro Excel, donde se referencia los valores numéricos de cada punto, considerando la distancia entre cada punto esta información será relevante para determinar luego la separación promedio de fracturas por unidad de muestreo y la frecuencia promedio en el talud en estudio, además se tomara en cada punto de muestreo la persistencia de la fractura muestreada, haciendo uso la wincha para longitudes cortas y un distanciómetro laser de mano para mayores longitudes.

Luego de la sistematización en programa de Microsoft Excel, se realizó el procesamiento de información mediante el uso del software Dips el cual permitió la realización e ingreso de puntos tomados para el cálculo del RQD en los taludes permitiendo la presentación estereográfica en una gráfica donde se podrá ver cada una de las familiar principales a partir del análisis que se realice, además se realizará un diagrama de rosetas en el Dips; proceso que permitió desarrollar el estudio a partir de la data obtenida que se evidencia dentro del área investigada, cuya resultante se presenta en cada una de las gráficas que permite realizar en el programa Dips.

El modelo de procesamiento en Excel, se puede ver en (Tabla 7), donde se detalle cada uno de los criterios recogidos en campo, información base para el procesamiento de la información.

Tabla 7

Detalle de la plantilla muestral, de la información recogida en campo

Formato de mapeo geomecanico							
Lugar : Carretera San Jeronimo-Paruro Km. 12+150 - Taludes. Estacion : 01 Hoja : 01 Fecha : 06-junio-2016 Por : J.V.T.							
Tipo Roca: Arenisca. Proposito : RQD. Azimut : S45°W Buzamiento : 0°							
N°	Hoja N°	sector	Dist (m)	Tipo	Orientación (°)		(m)
					Dip	DipDir	Persistencia
1	1 de 1	1	1.1	j	46	40	0.3
2	1 de 1	1	1.23	j	72	67	5.2
3	1 de 1	1	1.29	j	64	265	3.5
4	1 de 1	1	1.29	j	80	27	5.1
5	1 de 1	1	1.29	j	50	327	0.8
6	1 de 1	1	1.43	j	90	75	0.9
7	1 de 1	1	1.63	j	90	215	1.5
8	1 de 1	1	1.68	j	90	215	2.3
9	1 de 1	1	1.78	j	75	265	3.9
10	1 de 1	1	1.78	j	67	17	5.8
11	1 de 1	1	2.06	j	90	270	9.8
12	1 de 1	1	2.06	F	58	39	10.3
13	1 de 1	1	2.96	j	78	10	11.5
14	1 de 1	1	3.26	j	36	140	3.5
15	1 de 1	1	3.35	j	70	282	2.8
16	1 de 1	1	3.4	j	85	313	6.7
17	1 de 1	1	3.62	j	85	77	5.3
18	1 de 1	1	3.8	j	85	257	7.5
19	1 de 1	1	3.93	j	84	275	6.4
20	1 de 1	1	4.05	j	90	315	4.6
21	1 de 1	1	4.74	j	90	3	8.4
22	1 de 1	1	4.74	j	85	78	3.5
23	1 de 1	1	4.89	j	90	255	6.7
24	1 de 1	1	4.94	j	30	187	7.4
25	1 de 1	1	5.06	j	78	259	6.7
26	1 de 1	1	5.16	j	77	53	3
27	1 de 1	1	5.27	j	85	257	4.1
28	1 de 1	1	5.37	j	88	23	3.8
29	1 de 1	1	5.37	j	70	320	8.2
30	1 de 1	1	5.48	j	46	32	3.5

Nota: Se presenta el modelo de instrumento de levantamiento de información para la sistematización de la muestra.

Fuente: Elaboración propia

Estos datos de plantilla Excel, muestran cómo fueron introducidos las distancias en metros, para su procesamiento y sistematización en el software Dips v7.0, la misma permite ingresar la data generada y procesar, para así obtener diferentes criterios que permite el software a partir del dip y dip dirección.

5.1.2 Metodología

La metodología de trabajo inició con la recolección de data en campo, utilizando metodologías de mapeo geomecánica, además se realiza la identificación de la orientación en cada una de las familias, los cuales nos indicaron una preferencia de fracturas, que permitió estimar la calidad del RQD en el macizo rocoso.

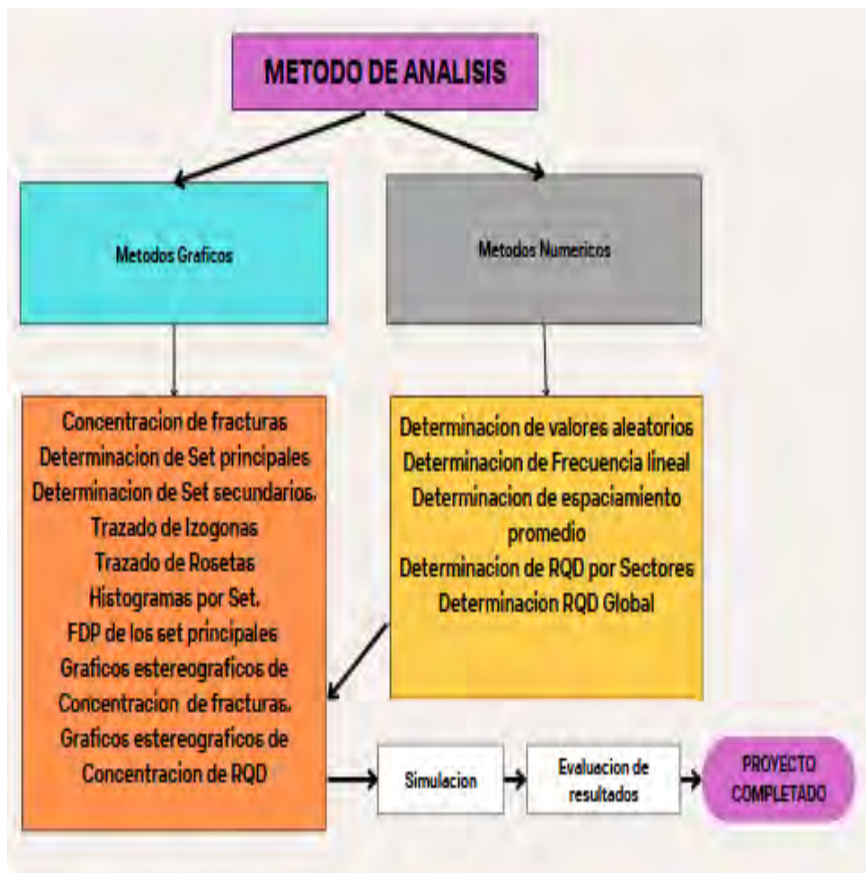
Los valores de las muestras del macizo permitieron el procesamiento por medio de los gráficos estereográficos utilizando el software Dips, permitieron realizar la captura de planos, pero sobre todo polos de planos, para la clasificación de cada familia (Set), tomando el valor de orientación del talud de para los tres sectores en que se muestreo de acuerdo con su orientación:

Sector 01 S 73° W, Sector 02 N 89° W y sector 03 N 11° E en cada caso las estaciones de muestreo para cada tramo y orientación se consideraron las líneas de detalle horizontales, para evitar correcciones posteriores en su procesamiento, se ingresados tres grupos de información de acuerdo a los tramos de muestreo con un total de 900 puntos; lo que permitirá realizar los análisis de información y obtener parámetros de fracturas del tipo de calidad de roca por tramos y orientaciones y en su conjunto como un todo.

En ese sentido, a partir del diseño muestral que presenta se muestreo también la persistencia del fracturamiento con el apoyo de los instrumentos ya mencionados, que permita dar un resultado de la calidad del macizo en su conjunto.

Además, para la confirmación de los datos del RQD sin sondeo, se utilizó el software SPSS, el cual permite establecer las diferentes pruebas de tipo estadístico de las fracturas y su comportamiento específico en el área motivo de estudio.

Figura22
Flujograma de Análisis



Flujograma para el análisis de la data con propósito de evaluación del RQD. Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Análisis

Se procedió análisis mediante el ingreso de data de campo en el Dips de la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12 de los tres tramos en que fue segmentado el macizo rocoso, los cuales presentan areniscas feldespáticas con algunas intercalaciones de lutitas, que es característico de las capas rojas que presenta el lugar.

En el análisis para el cálculo de la designación del tipo de calidad de roca realizado a través del procesamiento en el programa Dips, permitió la identificación de las características singulares que presenta cada tramo y la concentración de polos que conformaran familias principales y secundarias en el estudio planteado.

El análisis Dips arrojó la densidad y la orientación preferente de las fracturas, (set), que presenta el talud y en función a las gráficas generadas en el Dips se realizó la sectorización, para determinar la calidad rocosa que presenta la roca en el lugar el talud en estudio, cuya resultante se puede sostener a partir del análisis realizado.

En el procesamiento del diagrama de rosetas, el análisis de la variable con la frecuencia en función de las orientaciones de cada punto presenta las frecuencias de orientaciones (dip y dip dirección) de las discontinuidades estas, se procesaron de forma individual para cada sector el propósito es poder verificar su comportamiento comparativo entre los sectores de mapeo, tomando en cuenta la dirección del talud y por consiguiente en la orientación de las líneas de muestreo.

5.1.4 *Procesado de la información del macizo en Dips*

A partir del ingreso de la data numérica en el programa, se toma cada uno de los criterios que permiten la determinación de las características que presenta para cada sector del talud en evaluación, con el propósito final de aproximarnos a la calidad de roca del área estudiada con más confiabilidad, los ploteos gráficos y numéricos como resultado nos darán información valiosa para tratarla posteriormente valores serán procesados en Dips.(Digital Stereogram Imaging Programs) v.7.0 (Rocscience), Se procederá a desarrollar de acuerdo al plan de mapeo estructurado realizado para el talud es decir para los tres sectores en que fueron divididos (Sector 01, Sector 02 y Sector 03).

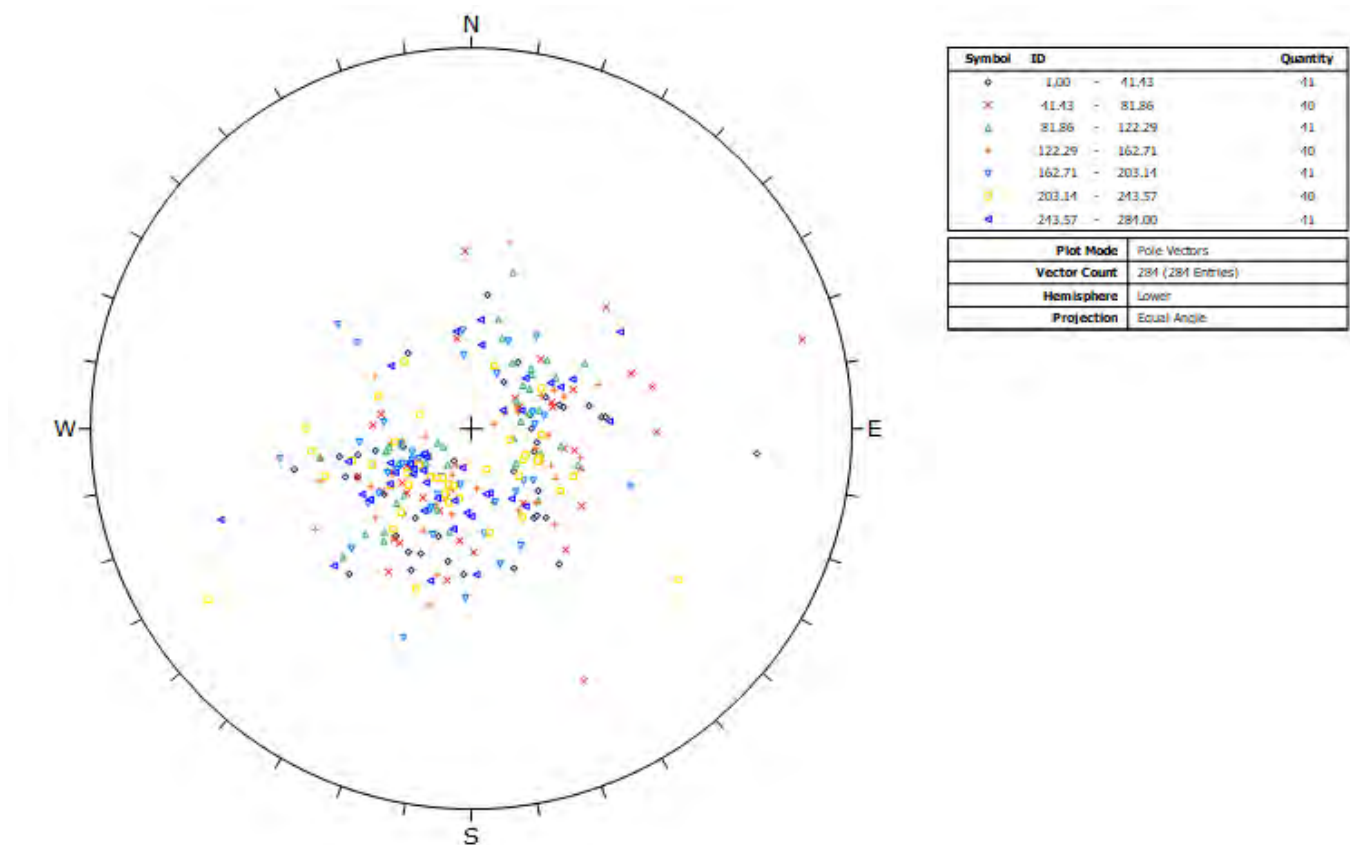
SECTOR 01

a. Área mapeada. Sector 01

El primer tramo con orientación S73°W y una longitud de 49.5 m

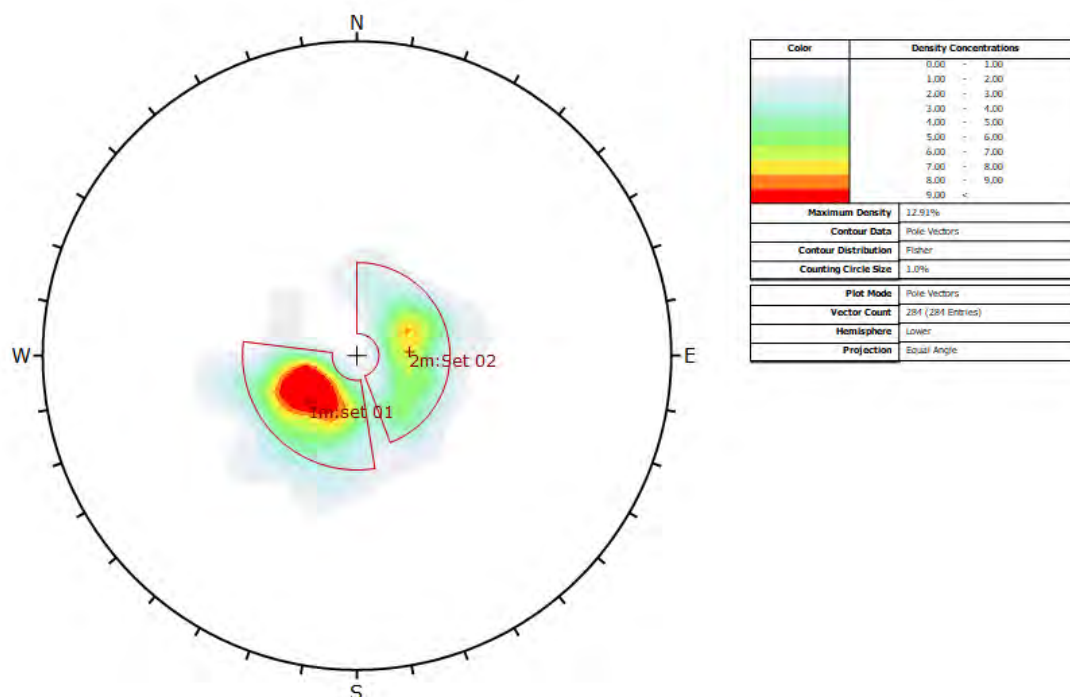
Figura 23

Proyección de polos, Sector 01



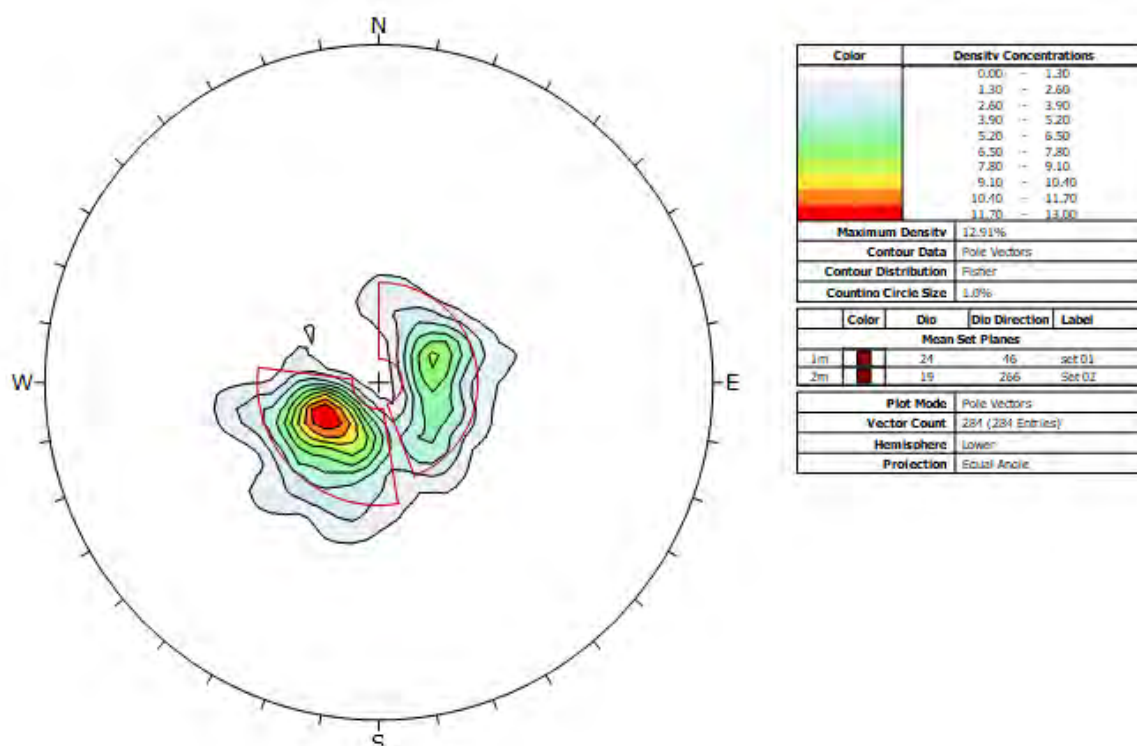
Nota: La imagen muestra el procesamiento en Dips, se aprecia la dispersión de los polos de las fracturas segmentados por porcentajes de concentración.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24*Curvas de isógonas porcentuales – Sector 01*

Nota: Agrupación de curvas de acuerdo con el número de polos por área para evidenciar la concentración para el sector 01

Fuente: Elaboración propia.

Figura 25*Identificación de concentraciones -Sector 01*

Nota: Agrupación resaltadas por área pone en evidencia la concentración de para los dos Set identificados en el sector 01; con ajuste de Fischer

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Orientación de cada set para sector 01

ID	Dip-dir(°)	Dip(°)
Set 01	226	66
Set 02	87	70

Fuente: Elaboración propia

Distribución de discontinuidades.

Para la definición en dominios estructurales, se ha tomado en cuenta el análisis estereográfico, agrupación de set (familias)

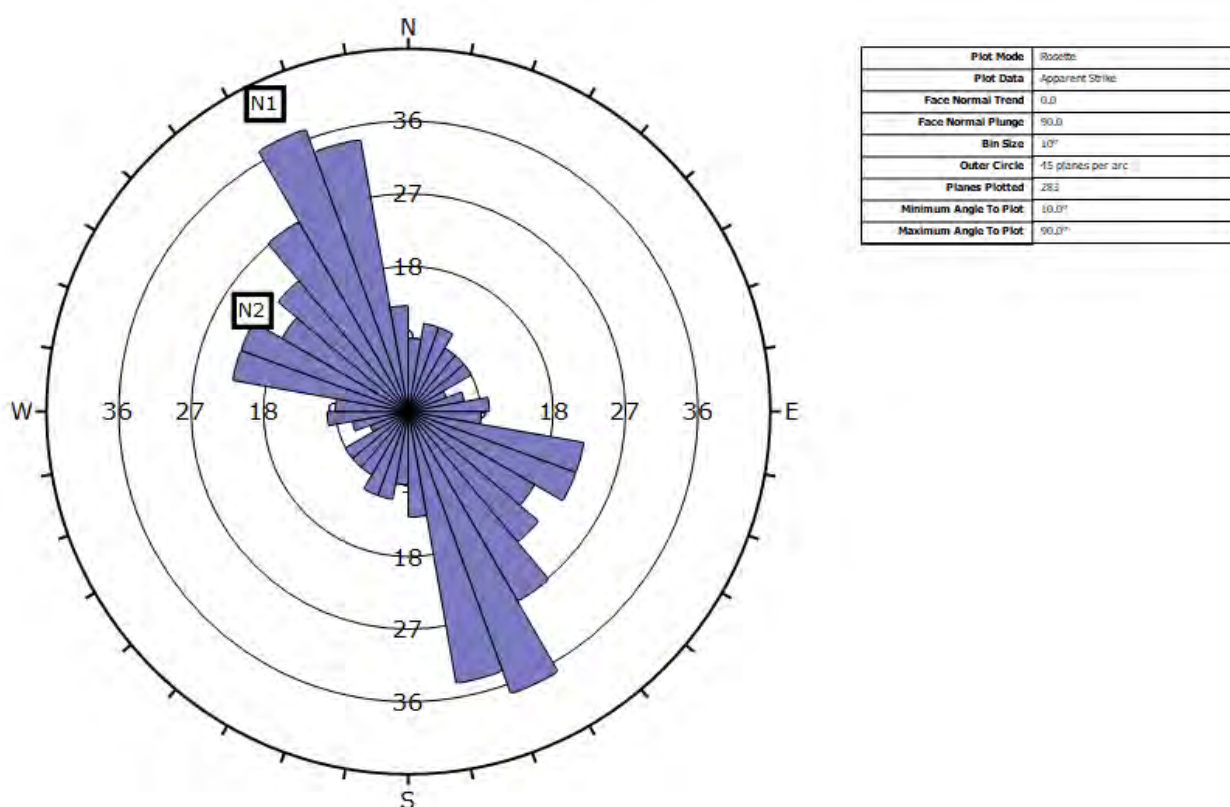
Para el Sector 01 del talud en estudio, se ha determinado dos dominios estructurales a las que se han identificado como set 01, set 02, sus características se muestran en el cuadro

Como se observa el set 01 tiene mayor concentración de valores en términos porcentuales se ha considerado valores que van de 5.2% a 13.0 %; como podemos ver el set 01 tiene valores más altos que el set 02 llega a valores del en el rango de 5.2% a 9.1 % ; así también el valor de Dip, para el set 01 es menos pronunciado que el set 02, con 66° y 70° en el caso del set 02, lo cual se podría tomar como una tendencia por la proximidad, en lo que existe una gran discrepancia es en los valores de Dip Dirección o Dirección de Buzamiento, así mismo la cantidad de polos que se considera en el Set 01 es de 118 y 58 respectivamente representando el 42% y 20% respecto del total de la muestra que es de 284 fracturas para el sector analizado; la diferencia de fracturas sin set identificado representan entonces 108 que se pueden considerar aleatorios y representan el 38%, se observa también que los valores porcentuales van desde el límite inferior considerado 5.2% pero su cúspide solo llega al 9.1% (color amarillo en el estereograma),que nos evidencia menos concentración de fracturas alrededor o en todo caso con mayor dispersión por área, además la mayor dispersión de valores en este set, aspecto que difiere con el set 01, el cual comparativamente entre los dos es el que tiene valores más

concentrados para el mismo área, por otra parte podemos observar que los set definitivamente tienen una preferencia en el cuadrante S-W, para set 01 y N-E, para el set 02.

Figura 26

Diagrama de roseta dominio N1 y N2 -Sector 01



Nota: La imagen se visualiza los planos de fracturas y su orientación preferencial en el diagrama de roseta. Fuente: Elaboración Propia.

De igual manera a los 02 set determinados en el gráfico de polos, en la roseta del Sector 01 se puede observar dos dominios estructurales a las que se ha denominado roseta N1, roseta N2.

Diagrama de roseta sector 01

Luego de procesar 284 datos de celdas geotécnicas, 8 datos correspondientes a fallas, así mismo 276 lecturas de fracturas simples, con datos de dip y dip dirección.

Con el análisis de rosetas realizado, podemos verificar que la frecuencia de discontinuidades está en dirección NW-SE, lo que corrobora la orientación preferente del grafico de polos que están concentrados predominantemente en el cuadrante S-W, conformando 02 set identificados, en la Fig. N° 22, se observa al igual que el diagrama de polos, se dan dos concentraciones de planos de fracturas (N1y N2),Tabla 08, las mismas que se corresponden con los Set (01 y 02), porque estas medidas son opuestas a los polos

Tabla 9

Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 01

Planos	Dip-dirección(°) Cuadrante II	Dip-dirección(°) Cuadrante IV	Rango (%)
N1	150-170	330-350	27
N2	100-120	280-300	20

Fuente: Elaboración propia

En esta roseta se puede también observar las preferencias según las direcciones, para el cuadrante II y IV, (Sentido horario), porcentajes según las orientaciones para N1, con 23.5% (promedio), de fracturas con orientaciones entre los 330° a 350°, N2, 20% de fracturas con orientación preferenciales de 280° a 300°.que guardan concordancia con el grafico de polos.

Estadísticas de los sets

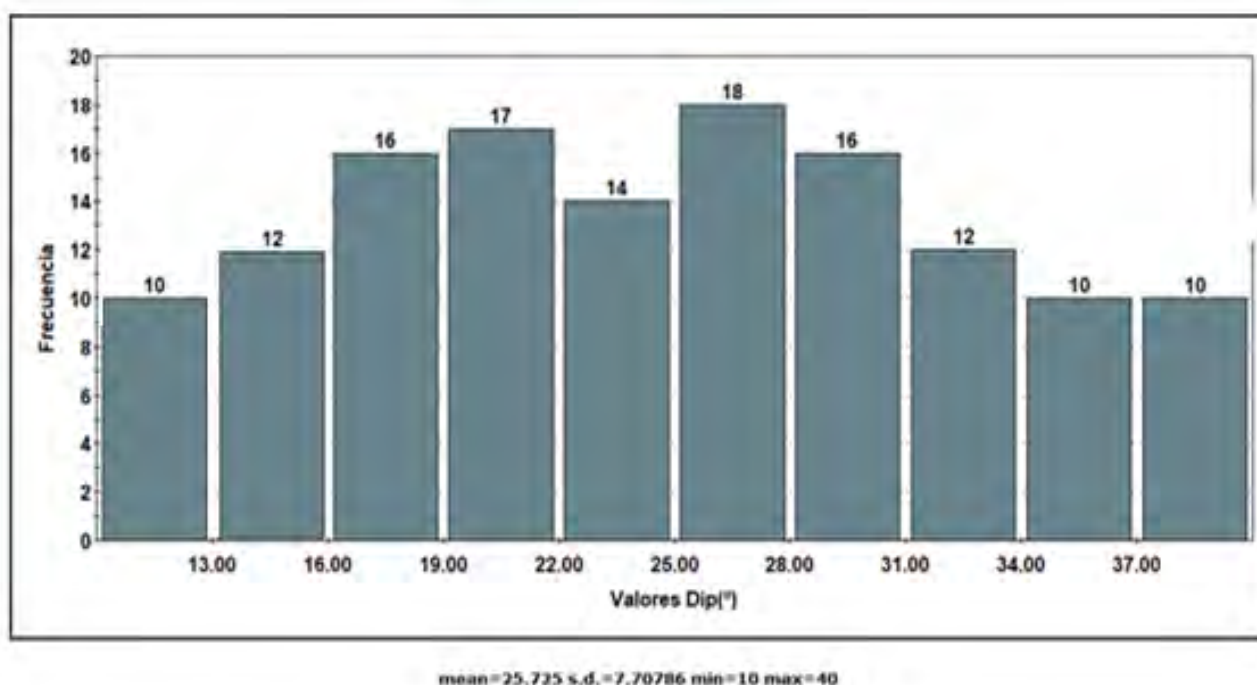
Del 100% de las fracturas ploteadas como polos, en el hemisferio inferior como proyecciones estereográficas, existen agrupaciones o “cluster”, de concentración de valores, que las diferencian del conjunto y representan las preferencias estructurales de las fracturas para cada sector mapeado, estas nos permitirán identificar sectores estadísticamente similares dentro de un rango de variabilidad para tener una idea más espacial de la distribución de las fracturas en el macizo rocoso en estudio, toda esta información es compilada en reportes para cada sector y para los diferentes set que se identifiquen en cada sector, así como las características propias de estas concentraciones,

Set 1 Sector 01

Se observa una tendencia unimodal con ligera asimetría con valores levemente superiores de los 28° a 37° la distribución es bastante simétrica como se aprecia en la Fig.22. los valores varían desde 10° a 40° con una media de 25 y desviación estándar de 7 relativamente pequeña respecto al rango de valores, mínimo y máximo.

Figura 27

Histograma de Dip Sector 01 -Set 1



Nota: Histograma de los valores que forman parte del set 1

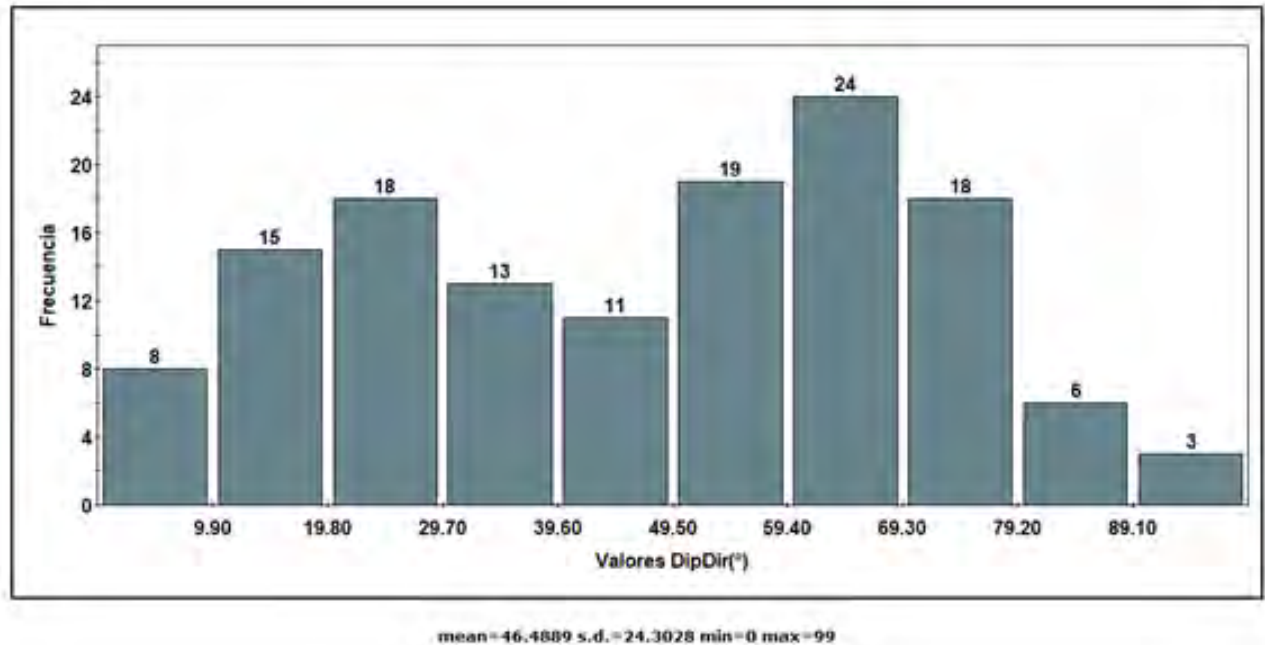
Fuente: Elaboración propia

En el histograma dip dir (fig. 23) se aprecia una marcada tendencia a agrupar valores en el primer cuadrante con las máximos valores de los 49° a 79° donde se presenta la principal moda (24), es importante también la preferencia de los 0° a los 49°, donde además se presenta una moda parcial de menor magnitud que la primera (18) podría concluirse que es bimodal con

una desviación estándar 24 que es amplia lo que nos indicaría mucha dispersión de valores alrededor de la media 46 como se aprecia en la Fig 23.

Figura 28

Histograma de Dip Dir Sector 01 -Set 1

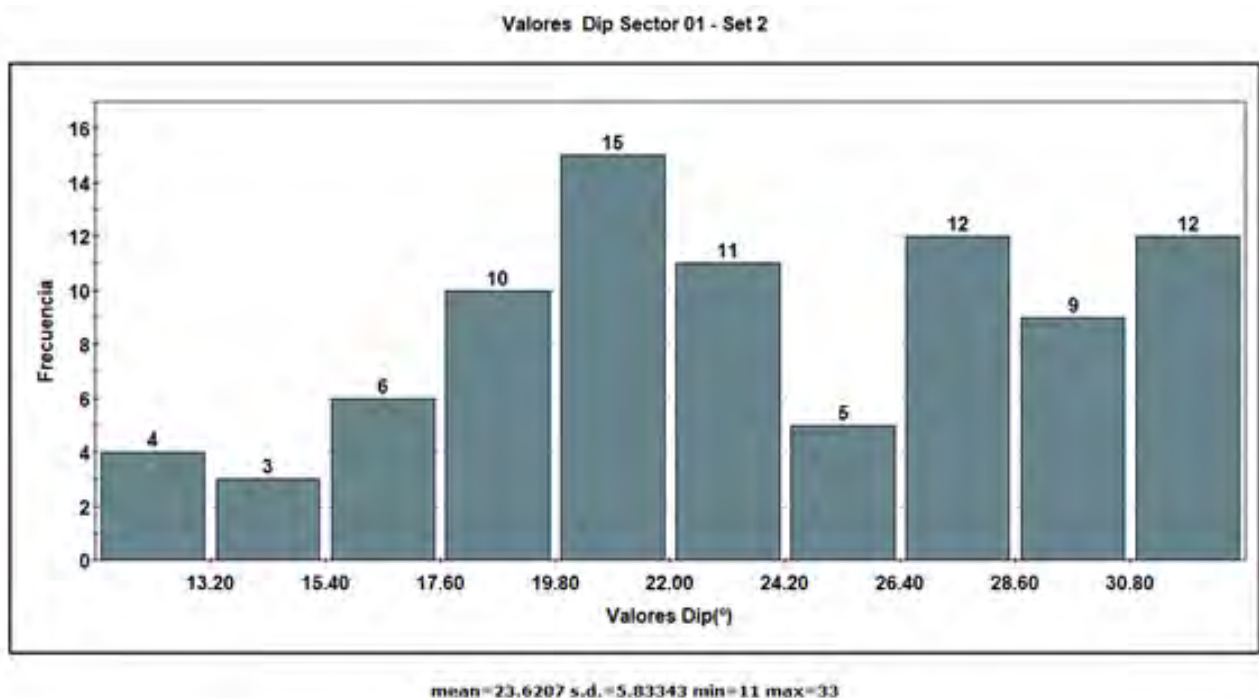


Nota: Histograma de los valores que forman parte del set 1

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Histograma de Dip Sector 01 -Set 2



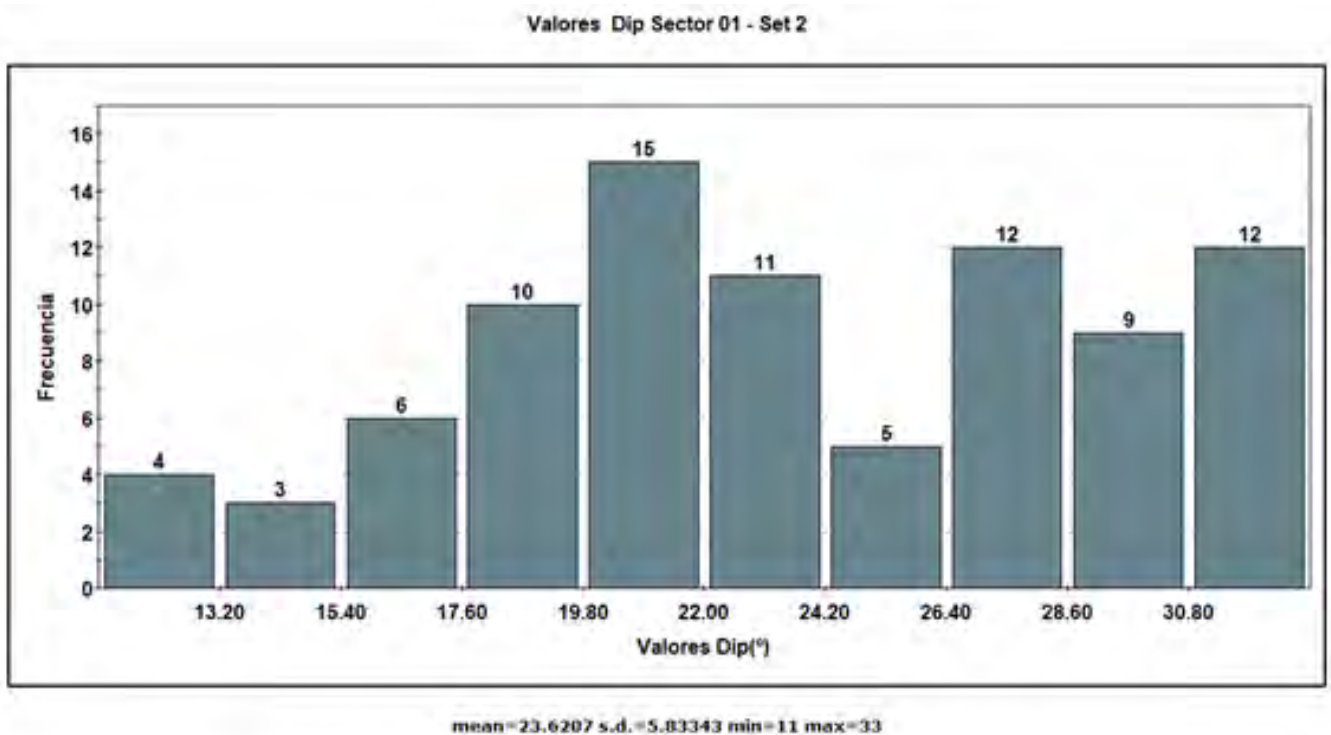
Nota: Histograma de los valores que forman parte del set 2

Fuente: Elaboración propia

Los Valores en el histograma de Dip, para el Set 2 muestran una cola derecha con mayores valores (12,9,12), comparada a la izquierda con valores mucho menores estos valores se dan preferentemente de los 0° a 17° de las abscisas (dip), indicándonos que las fracturas en ese set 2, tienen pocos valores bajos, (3,4,6), entre los 11° a 17° de dip, con un máximo de los 19° a 22° con moda de 18 valores, se observa una marcada asimetría con sesgo predominante de valores mayores y dip mayores, para un valor medio de 23 tiene una desviación estándar reducida de 5, los Dip se distribuyen de 11° a 33° para este Set 2

Figura 30

Histograma de Dip Dir Sector 01 -Set 2



Nota: Histograma de los valores que forman parte del set 2

Fuente: Elaboración propia

En este histograma domina una dirección de buzamiento entre los 243° y 257° con una moda muy fuerte casi el doble de las contiguas de 20, definitivamente domina el conjunto, con una media de 264 y alta variabilidad de 38, en la cola derecha sin embargo se percibe un pequeño grupo con una moda muy inferior(12), que centra valores a su alrededor pudiendo ser un indicador de bimodalidad, el conjunto muestra valores 185° a 272° dirección S-W, tercer cuadrante que representan el 56% y 272° a 330° dirección N-W, cuarto cuadrante de diferente magnitud en su tendencia que representa el 44% del total de fracturas con esa preferencia.

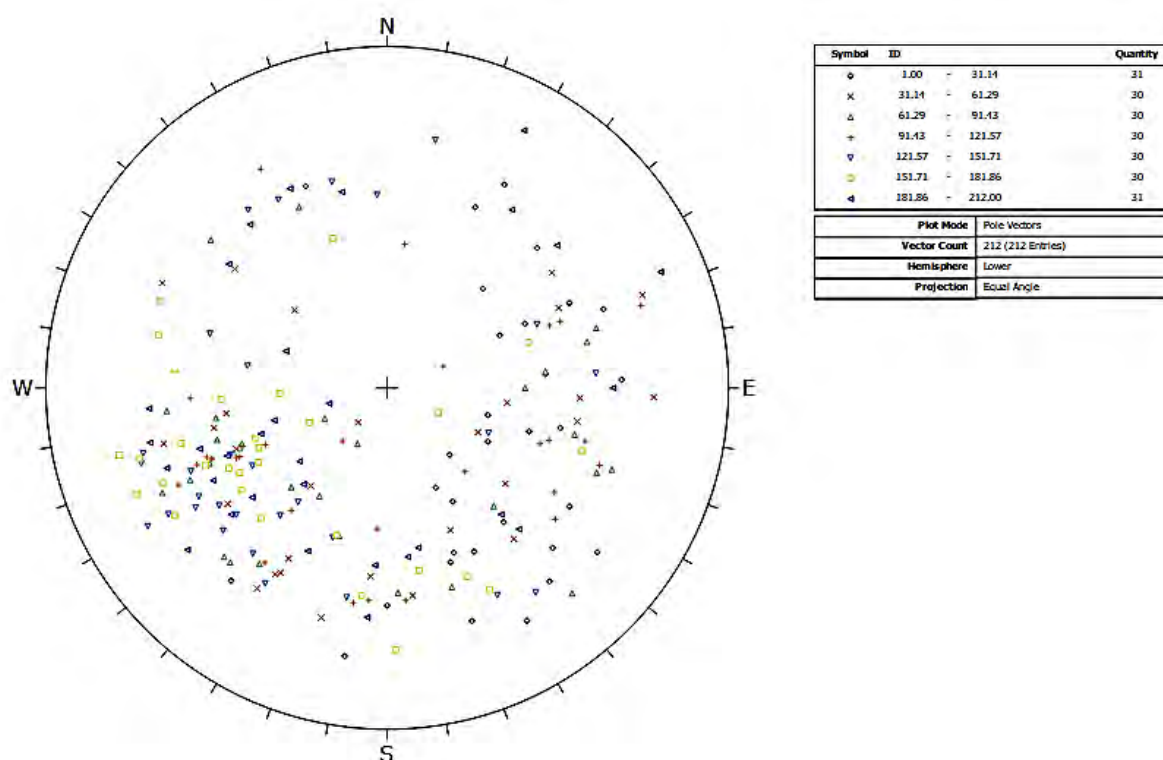
Sector 02

Área mapeada. Sector 02

Orientación promedio $N89^{\circ}W$, tramo de transición longitud 40 m.

Figura 31

Distribución de Polos Sector 02

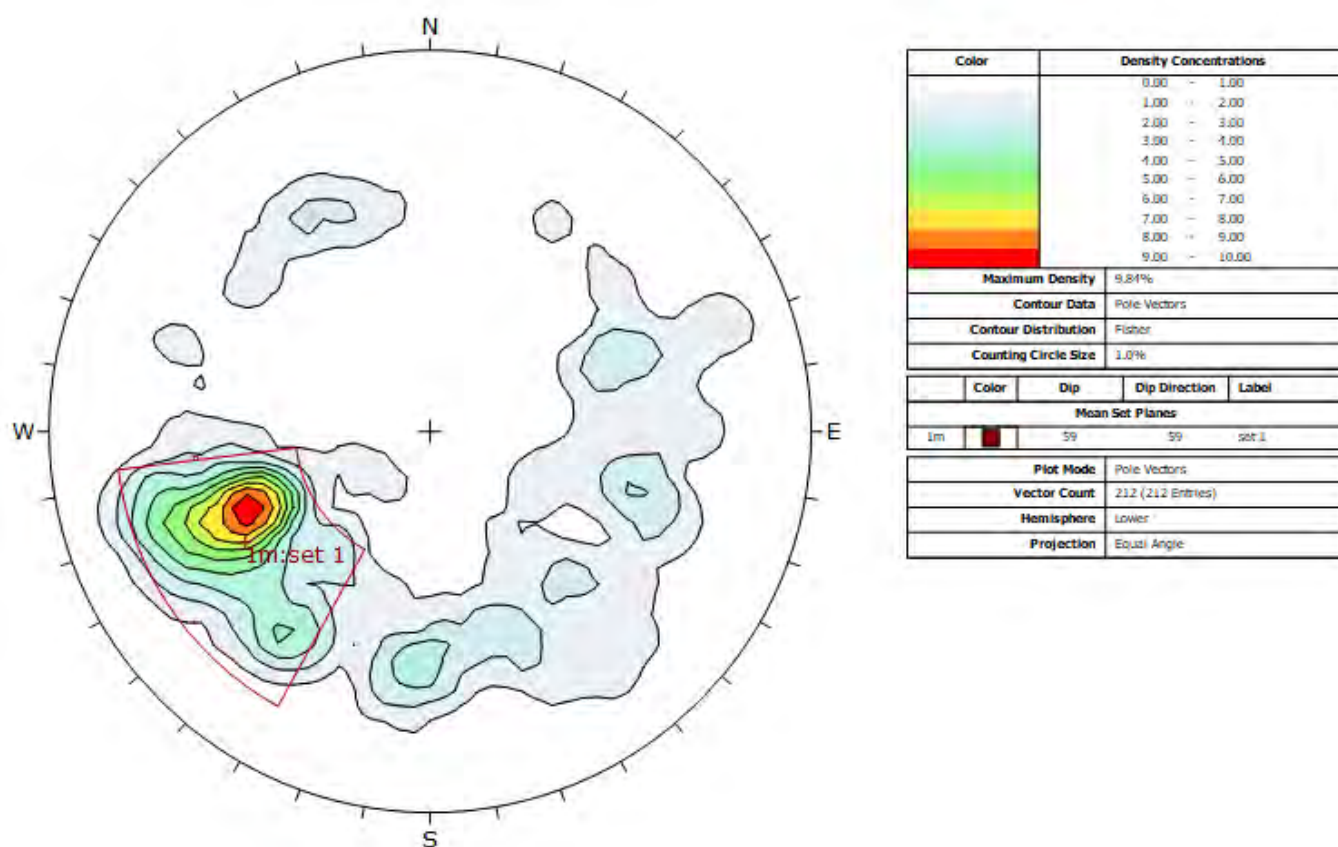


Nota: La imagen muestra el procesamiento en Dips, se aprecia la dispersión de los polos de las fracturas segmentados por porcentajes de concentración.

Fuente: Elaboración propia.

Figura32

Curvas de isógonas porcentuales e identificación de Set -Sector 02

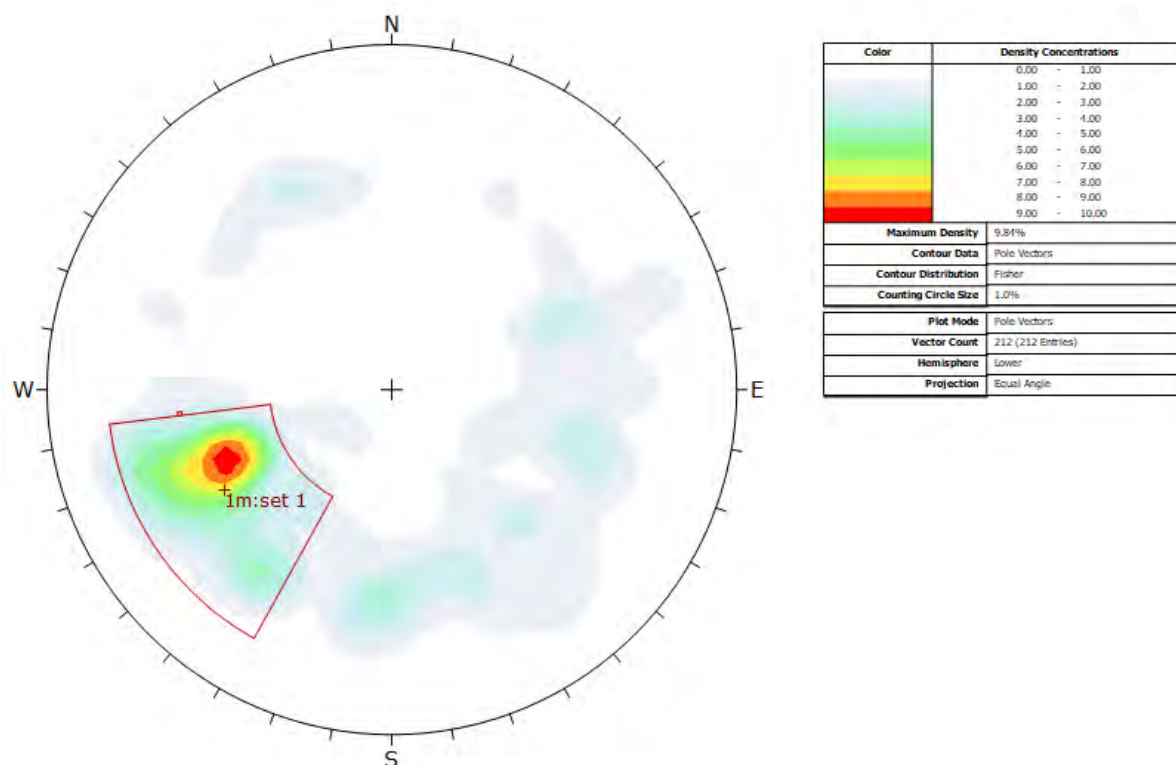


Nota: Agrupación de curvas de acuerdo con el número de polos por área para evidenciar la concentración para el sector 02

Fuente: Elaboración propia.

Figura33

Identificación de concentración – Sector 02



Nota: Agrupación resaltadas por área pone en evidencia la concentración de para los dos Set identificados en el sector 02; con ajuste de Fischer

Fuente: Elaboración propia.

Tabla10

Orientación de cada set para sector 02

ID	Dip-dir(°)	Dip(°)
Set 01	58.95	59.1

Fuente: Elaboración propia

- Distribución de discontinuidades.

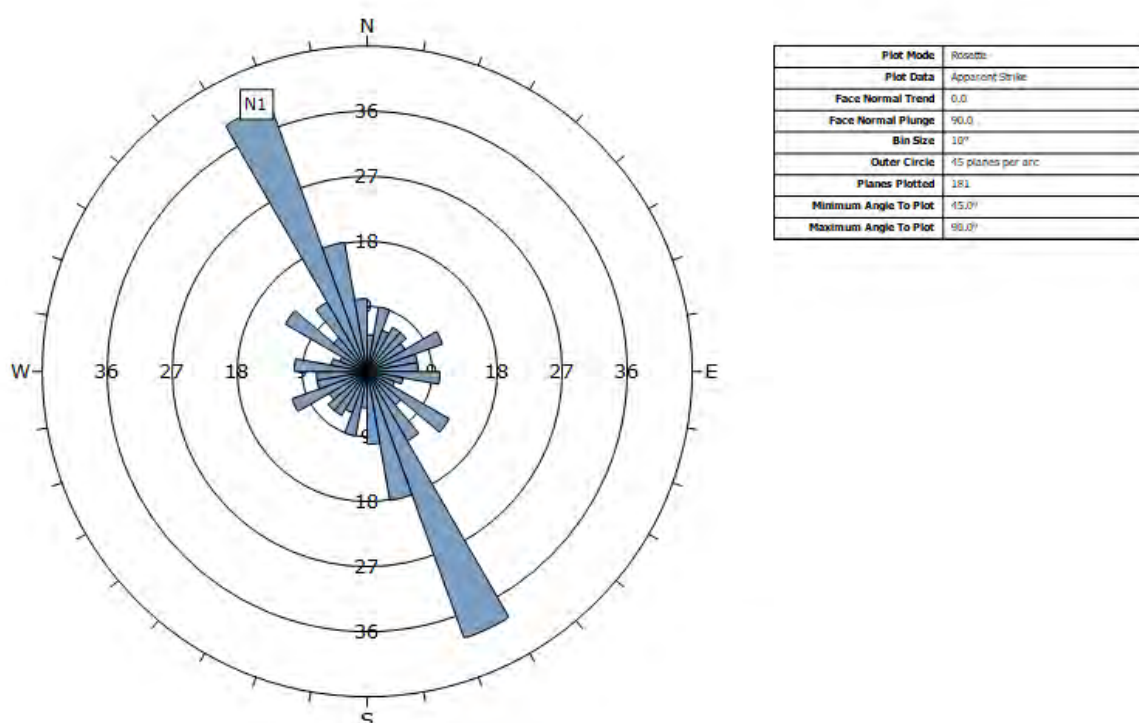
Se ha definido para el dominio estructural, (tomando como criterio solo las fracturas, qué son motivo del estudio). Para el Sector 02 del talud en estudio, se ha determinado un dominio estructural que se han identificado como set 01, sus características se muestran en el cuadro (N.º 08)

Como se observa el set 01 tiene la mayor concentración de valores en términos porcentuales se a considerado valores que van de 3.0% con una cúspide de 9.8 % (color rojo en el estereograma), mostrando una alta concentración relativa al contexto de dispersión de otros valores que no llegan a mostrar agrupación preferencial, constituyendo un grupo

aleatorio, así mismo lo constituyen 77 fracturas representando el 35% del total, siendo aleatorios 143 que representan el 65%, fracturas respecto del total de la muestra que es de 212 fracturas para el sector analizado; la alta dispersión o concentración se podría explicar por la concentración de esfuerzos tectónicos en algunas orientaciones, la concentración que destaca como una isla es llamativa en ese sentido, por otra parte podemos observar que el set definitivamente tienen una preferencia en el cuadrante S-W, para set 01.

Figura34

Diagrama de roseta dominio N1 – Sector 02



Nota: Se muestra las fracturas y sus orientaciones preferenciales set Set 1 del Sector 02.

Fuente: Elaboración Propia

Se han procesado 212 datos de celdas geotécnicas, 5 datos correspondientes a fallas, así como 207 datos de dip y dip dirección, de fracturas simples, Con el análisis de rosetas realizado, podemos verificar que la frecuencia de discontinuidades está en dirección NW-SE, lo que corrobora la orientación preferente del grafico de polos que están concentrados predominantemente en el cuadrante S-W, conformando 01 set identificados, en la Fig. N° 27, se observa al igual que el diagrama de polos, se da en una concentración de planos de fracturas

(N1),Tabla 08, las mismas que se corresponden con los Set (01 y 02), porque estas medidas son opuestas a los polos.

Tabla11

Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 02

Planos	Dip-dirección(°) Cuadrante II	Dip-dirección(°) Cuadrante IV	Rango (%)
N1	150-160	330-340	10-10

Fuente: Elaboración propia.

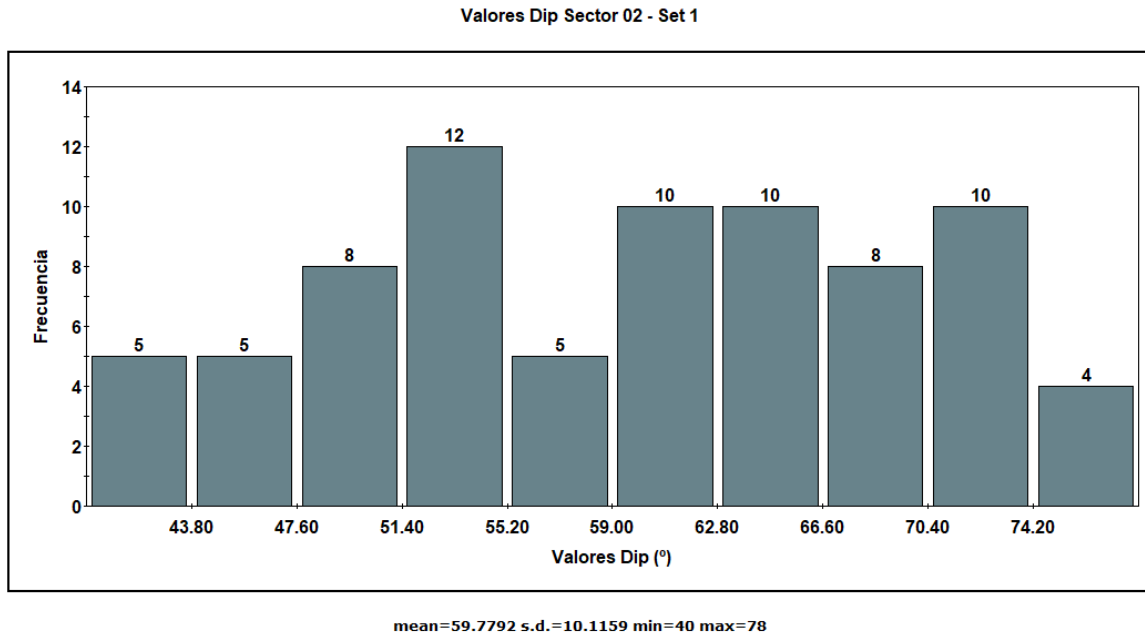
En esta roseta se puede también observar las preferencias según las direcciones, para el cuadrante II y IV, (Sentido horario), porcentajes para el único set identificado según las orientaciones para N1, con 18.6 %, de fracturas con orientaciones entre los 150° a 160°.que guardan concordancia con el grafico de polos.

b.1 Sector 02 Set 1

En la imagen de los valores de Dip, se observa una tendencia unimodal con ligera con una cúspide de 12 entre los 51° a 55° la distribución es bastante simétrica como se aprecia en la Fig.30.los valores varían desde 40° a 78° con una media de 59 y desviación estándar de 10 con un coeficiente de variación C.V. de 16.9 que nos indican una variabilidad moderada respecto al rango de valores, mínimo y máximo.

Figura35

Histograma de Dip Sector 02 -Set 1

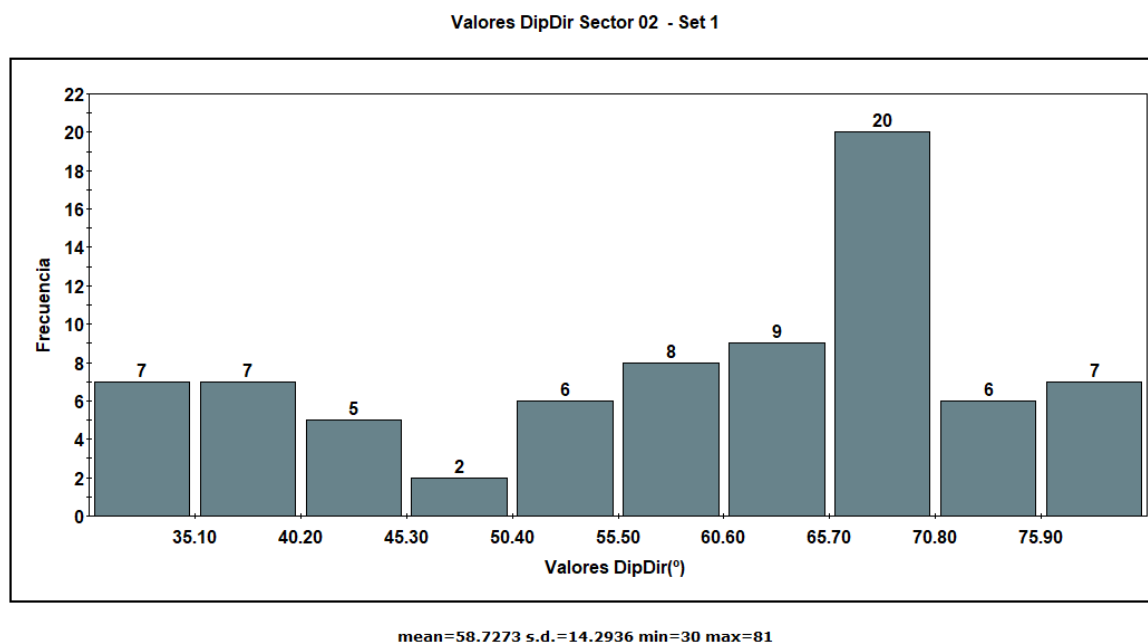


Nota: Histograma de los valores que forman parte del set 2

Fuente: Elaboración propia

En el histograma dip dir (fig. 31) se aprecia una marcada tendencia a agrupar valores en el primer cuadrante con los máximos valores de los 65° a 70° donde se presenta la principal moda (20), definitivamente es unimodal con un C.V. de 24 que muestra una variabilidad moderada respecto del valor mínimo de 31 y máximo de 81 el valor alto de moda en el rango se podría deber a una concentración de paleo esfuerzos que fracturaron más el sector en esa orientación

Figura36
Histograma de Dip Sector 02 -Set 1



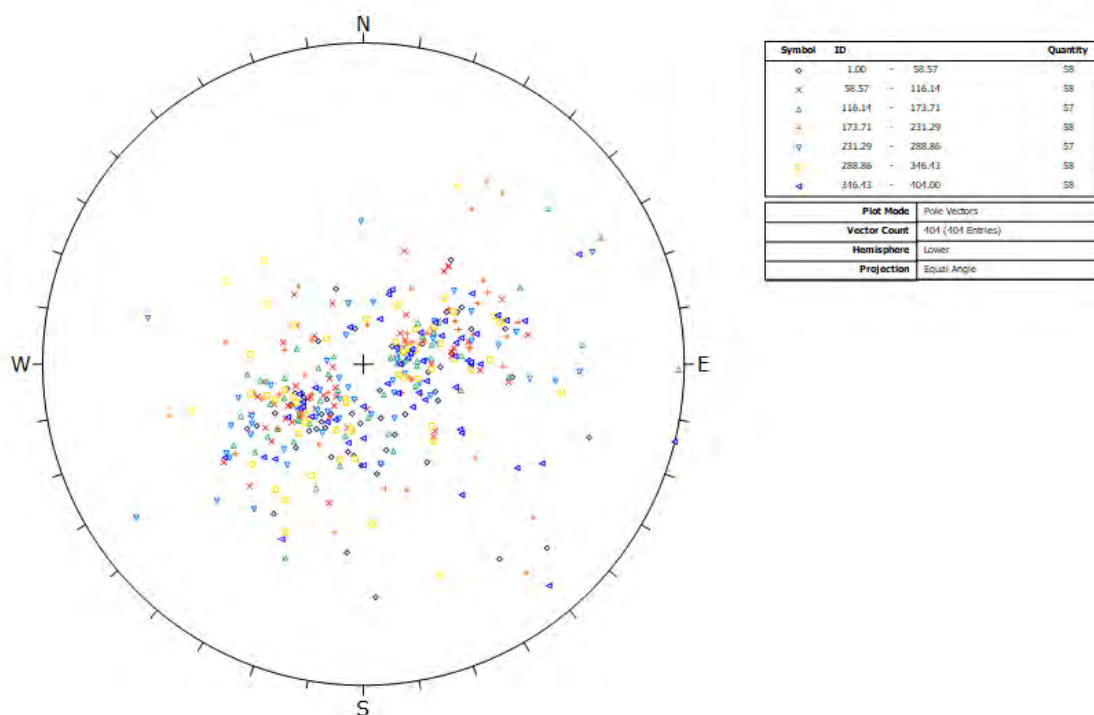
Sector 03

a. Área mapeada. Sector 03

Orientación promedio N11°E tramo longitud 50 m

Figura
Proyección de polos, Sector -03

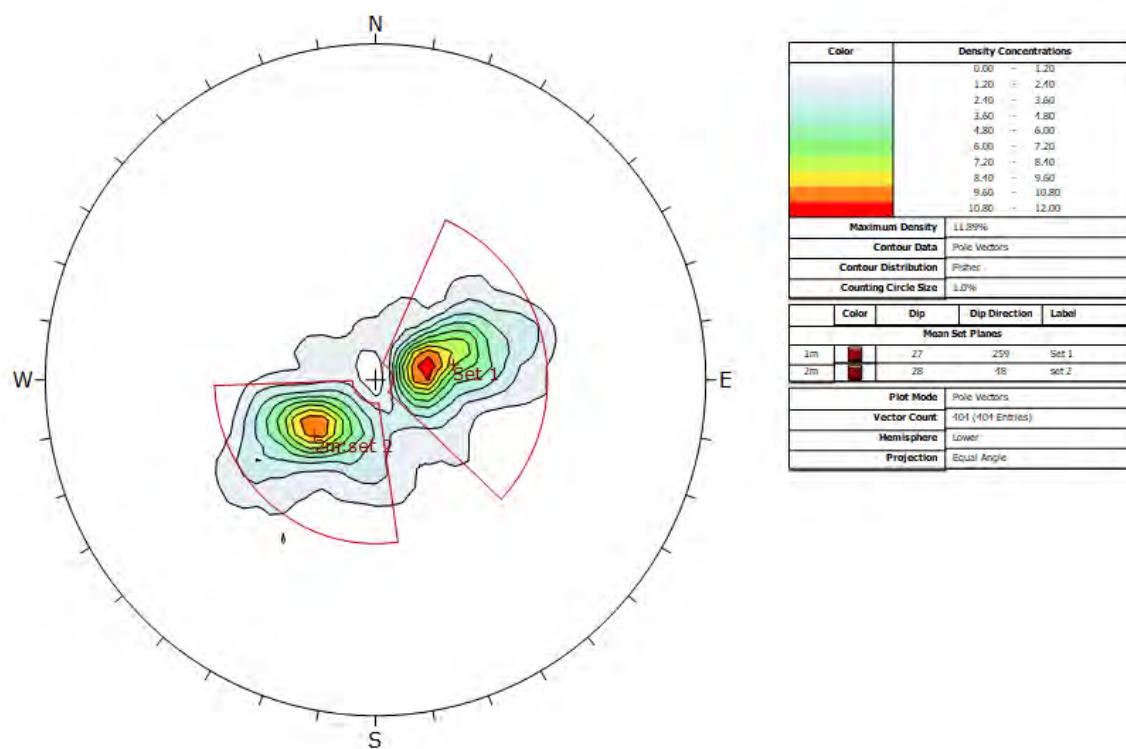
37



Nota: La imagen muestra el procesamiento en Dips, se aprecia la dispersión de los polos de las fracturas segmentados por porcentajes de concentración. para el sector 03

Fuente: Elaboración propia.

Figura38
Curvas de isógonas porcentuales e identificación de Set -Sector 03

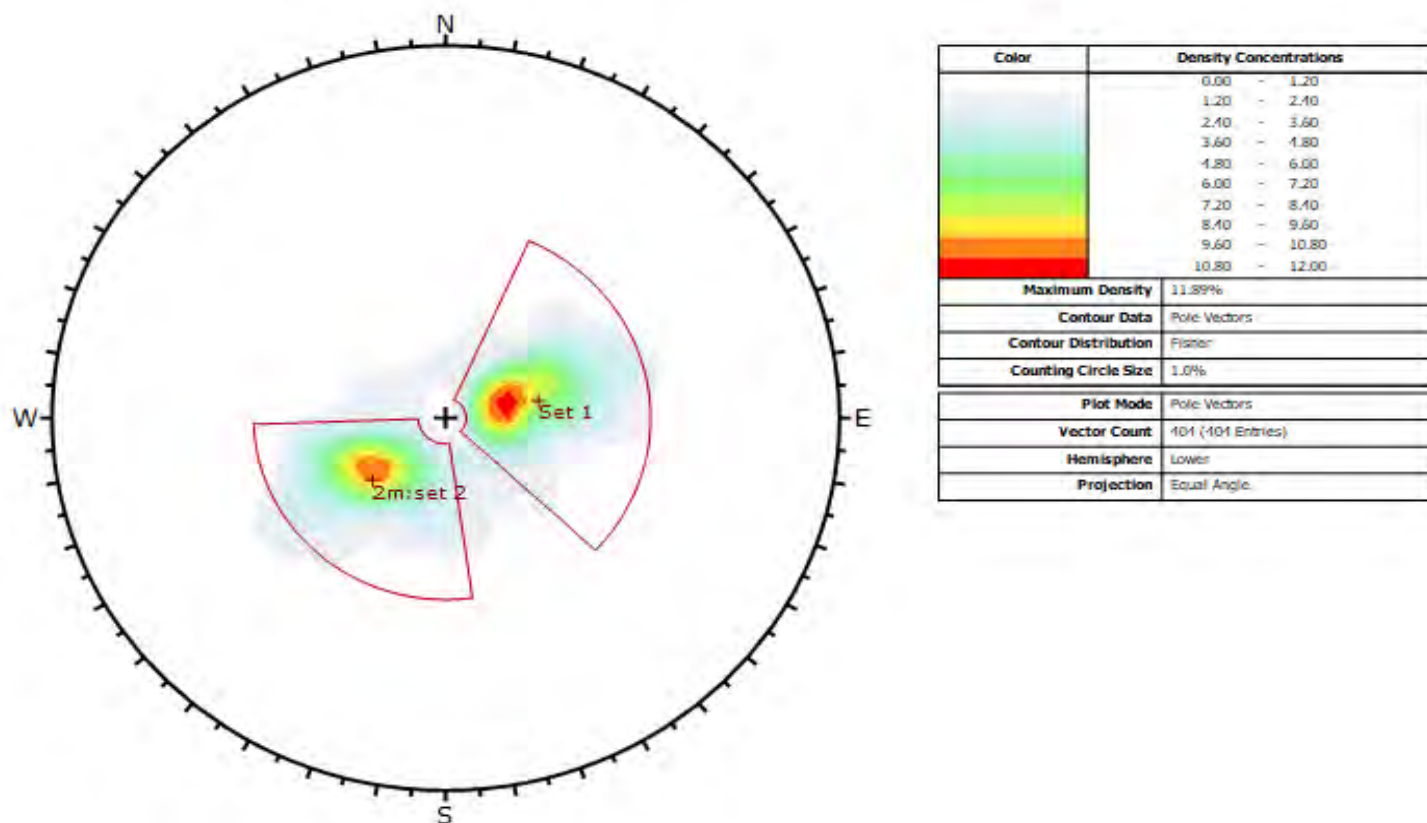


Nota: Agrupación de curvas de acuerdo con el número de polos muestran dos sets para el sector 03

Fuente: Elaboración propia

Figura39

Curvas de isógonas porcentuales e identificación de Set -Sector 03



Nota: Agrupación resaltadas por área pone en evidencia la concentración de para los dos Set identificados en el sector 03; con ajuste de Fischer

Fuente: Elaboración propia

Tabla12

Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 02

ID	Dip-dir(°)	Dip(°)
Set 01	285.54	27.14
Set 02	47.9	27.69

Fuente: Elaboración propia

Para el Sector 03 del talud en estudio, se ha determinado dos dominios estructurales a las que se han identificado como set 01, set 02, sus características se muestran en el cuadro

Como se observa el set 01 tiene mayor concentración de valores en términos porcentuales se ha considerado valores que van de 3.0 % a cúspide de 11.39 %; (color rojo), como podemos ver el set 01 tiene valores ligeramente más altos que el set 02 llega a valores del en el rango de 3.0% a 10.0 % (color anaranjado), así también el valor de Dip, para el set 01 es menos pronunciado que el set 02, con 27.14° y 27.69° en el caso del set 02, que en términos estadísticos y considerando el tipo de variable en estudio, es irrelevante considerándose para propósito prácticos iguales, en lo que existe una gran discrepancia es en los valores de Dip Dirección o Dirección de Buzamiento, para Dip Dir. del set 01 es 285.54° en el III cuadrante, (sentido horario) y para el Set 02 un valor de 47.9° en el I cuadrante, es decir casi opuestos en orientación y similares en valores de Dip, que se podría interpretar por esfuerzos tectónicos muy alineados, así mismo la cantidad de polos que se considera en el Set 01 es de 168 y 144 respectivamente representando el 42% y 36 % respecto del total de la muestra que es de 404 fracturas para el sector analizado; la diferencia de fracturas sin set identificado representan entonces 92 que se pueden considerar aleatorios y representan el 22 %, que nos evidencia así mismo que los valores aleatorios sean considerablemente menores y una tendencia a generar “ Cluster”, más concentración de fracturas alrededor o en todo caso con mayor dispersión por área.

Distribución de discontinuidades.

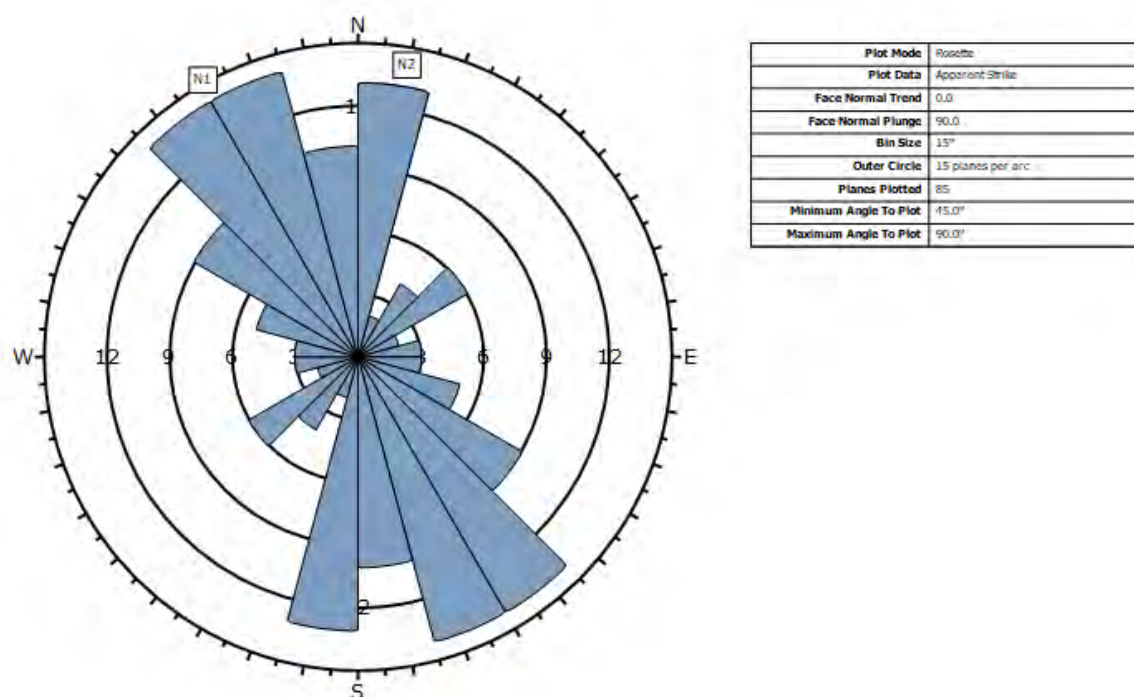
Se ha definido para el dominio estructural, (tomando como criterio solo las fracturas, qué son motivo del estudio). Para el Sector 02 del talud en estudio, se ha determinado un dominio estructural que se han identificado como set 01, sus características se muestran en el cuadro (N.º 08)

Como se observa el set 01 tiene la mayor concentración de valores en términos porcentuales se ha considerado valores que van de 3.0% con una cúspide de 9.8 % (color rojo en el estereograma), mostrando una alta concentración relativa al contexto de dispersión de otros valores que no llegan a mostrar agrupación preferencial, constituyendo un grupo

aleatorio, así mismo lo constituyen 77 fracturas representando el 35% del total, siendo aleatorios 143 que representan el 65%, fracturas respecto del total de la muestra que es de 212 fracturas para el sector analizado; la alta dispersión o concentración se podría explicar por la concentración de esfuerzos tectónicos en algunas orientaciones, la concentración que destaca como una isla es llamativa en ese sentido, por otra parte podemos observar que el set definitivamente tienen una preferencia en el cuadrante S-W, para set 01.

Figura40

Diagrama de roseta dominio N1 – Sector 03



Nota: Se muestra las fracturas y sus orientaciones preferenciales para 2 Set del Sector 03.

Fuente: Elaboración propia

Se han procesado 404 datos de celdas geotécnicas, 3 datos correspondientes a fallas, así como 401 datos de dip y dip dirección, de fracturas simples, Con el análisis de rosetas realizado, podemos verificar que la frecuencia de discontinuidades está en dirección NW-SE, lo que corrobora la orientación preferente del grafico de polos que están concentrados predominantemente en el cuadrante S-W, conformando 01 set identificados, en la Fig. N° 27,

se observa al igual que el diagrama de polos, se da en una concentración de planos de fracturas (N1),Tabla 08, las mismas que se corresponden con los Set (01 y 02), porque estas medidas son opuestas a los polos.

Tabla13

Orientación de planos de fracturas preferentes para tramo 03

Planos	Dip-dirección(°) Cuadrante I y II	Dip-dirección(°) Cuadrante II y IV	Rango (%)
N1	135-165	315-345	30-30
N2	0-15	180-195	15-15

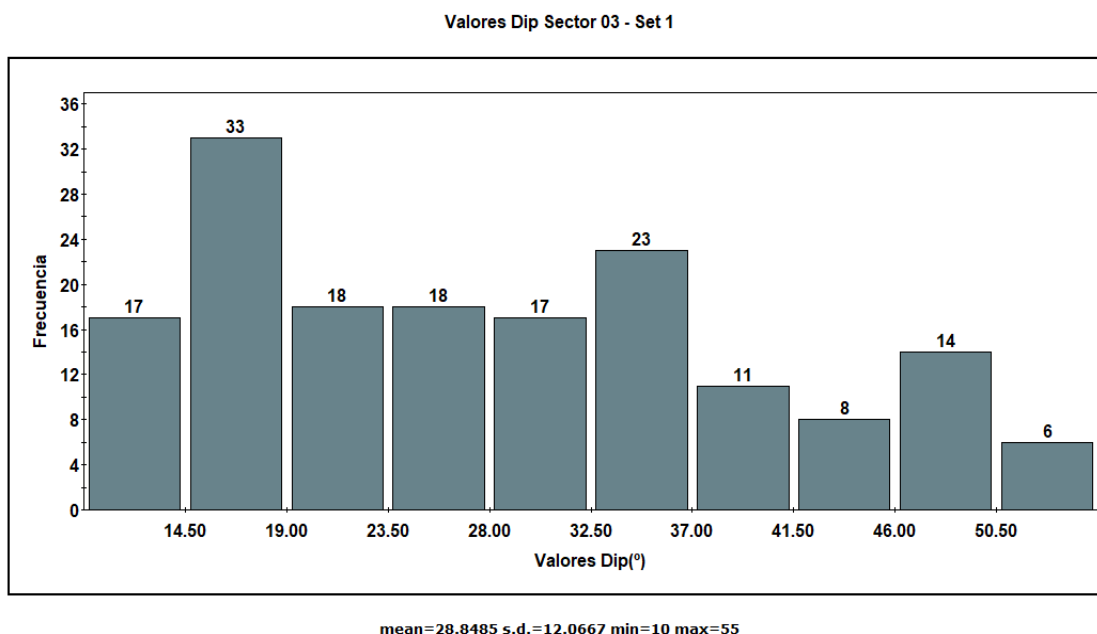
Fuente: Elaboración propia

En esta roseta se puede también observar las preferencias según las direcciones, para el cuadrante I- II y II- IV, (Sentido horario), la concentración N1 es la mayor orientación de las fracturas con los bloques de 15 cada uno destacan fuertemente, seguido de la concentración N2 que ligeramente inferior se podría mencionar a partir del segundo grupo uno menor pero definitivamente los siguientes son muy poco representativos guarda concordancia con los sets identificados.

El histograma de dip, muestra en la fig. (33), para el sector 03 un valor alto destaca con 33 valores que van de 14° a 19° es notoria la asimetría con sesgo aparentemente negativo, (mayor presencia de valores bajos comparativamente con los altos), con un C.V. de 43% indicaría alta dispersión de valores con un valor medio de 28, valor mínimo de 10 y máximo de 55, que ratifica la predominancia hacia valores menores de dip.

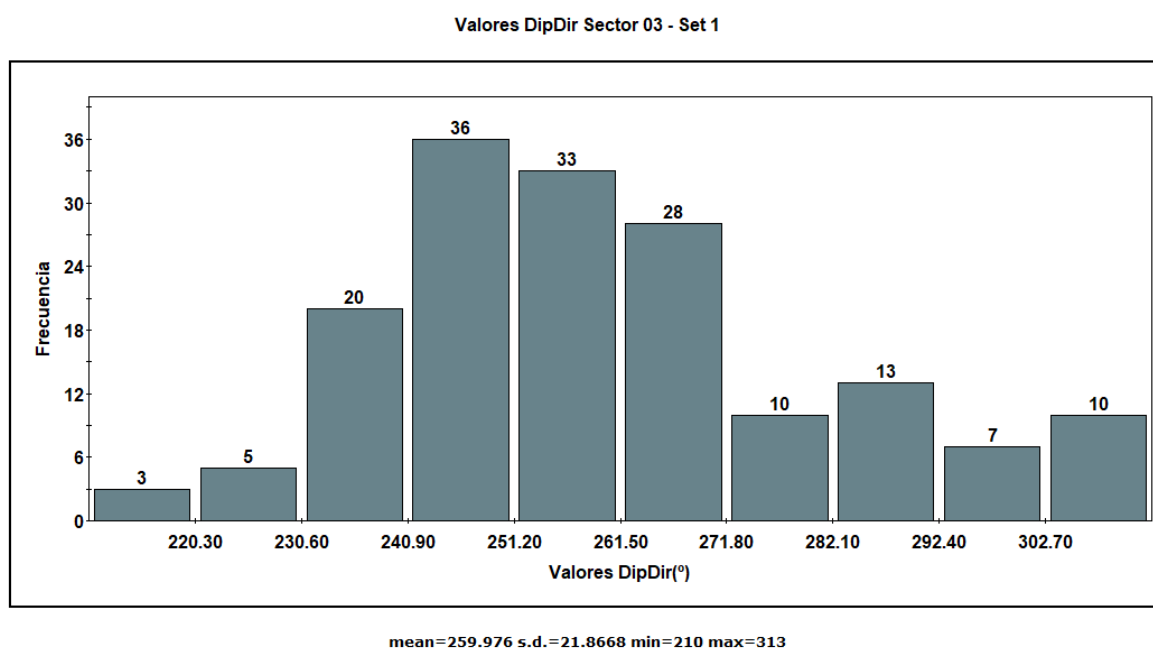
Figura41

Histograma de Dip Sector 03 -Set 1



El histograma de Dip Dir (fig.34), muestra una alta simetría central indicando claramente una preferencia dominante entre los 240° a 270° y valores 36,33 y 28 como valores preferenciales de orientación, su C.V. 8% y min de 210° y 313°, con un valor medio de 259° con extremos izquierdo de 49 y 54 derecho, muestra su simetría.

Figura42
Histograma de Dip dir Sector 03 -Set 1



En el grafico Fig. 35, se muestra la Dip del set 2 del sector 3 del área en estudio y se observa de los 22° a 35° de dirección de buzamiento con valores de 27,26 y 19 que igualmente se observa simetría central con C.V.34% y valor mínimo de 10° y máximo de 52° con una media de 29°, el valor de alto C.V, se explica por las discrepancias entre las frecuencia altas y bajas.

En el histograma Fig. 36, de Dip Dir del set 2 se observa un comportamiento muy peculiar una alta concentración de valores 34,84 y 19 valores en un rango de 0° a 106° para luego no existir ningún valor de los 106° a 319°, y existe solo 3 valores de los 319°-355° esto se podría explicar por la no presencia en el set 2 del sector 3 del talud un sector con fracturas nulas en ese rango y sector específicamente y mas precisamente que conforman el Set 2, lo más probable sin embargo es que estos 3 valores no pertenezcan al set 2.

Figura43
Histograma de Dip Sector 03 -Set 2

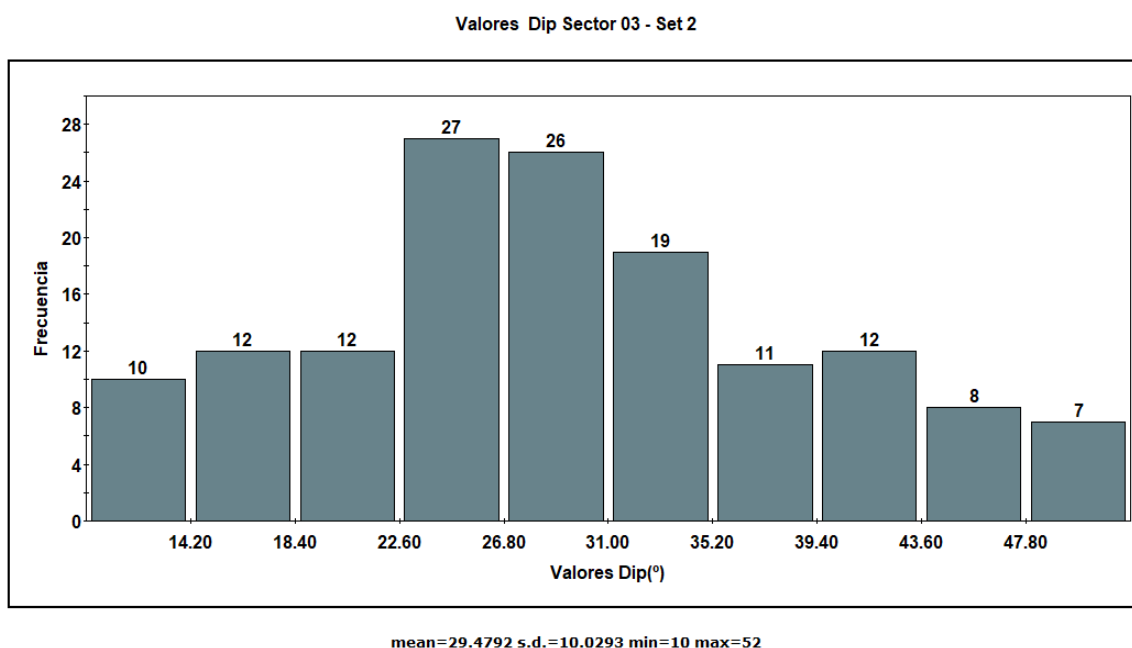
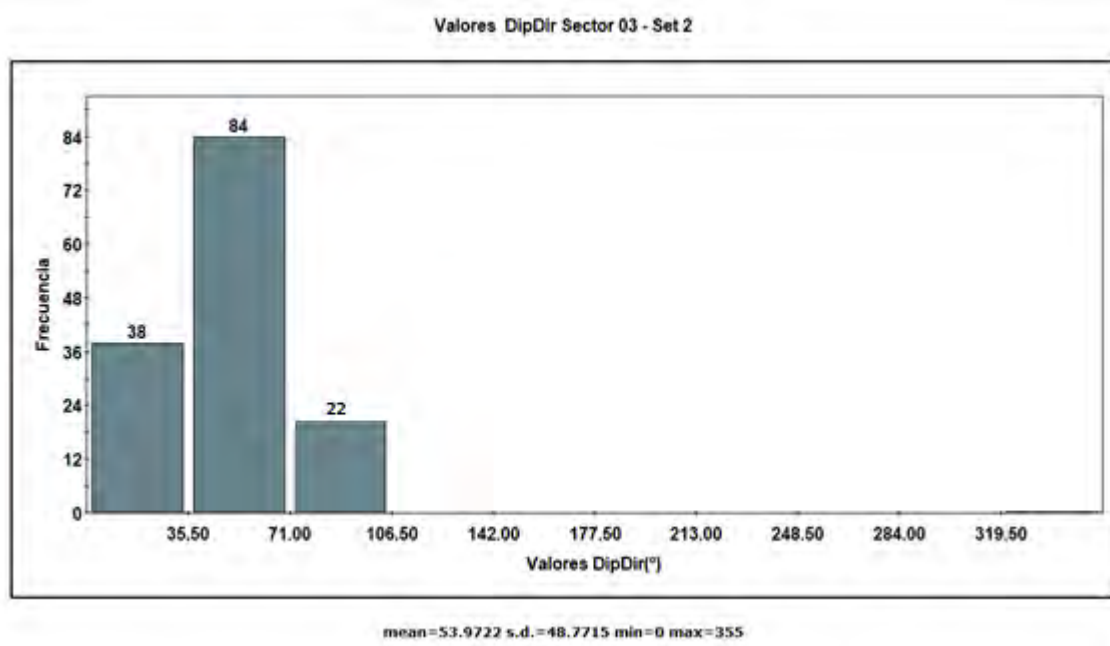


Figura44
Histograma de Dip dir Sector 03 -Set 2

**Tabla14**

Resumen consolidado Sector 01,02 y 03

Sector	Set	Nº fracturas	%
01	01	118	42
	02	58	20
	Aleatorios	108	38
02	01	77	36
	Aleatorios	135	64
	01	168	42
03	02	144	36
	Aleatorios	92	22

Fuente: Elaboración propia

5.1.5 Estimación del espaciamiento entre fracturas.

Sabiendo que el número de fracturas es N, y la longitud de la línea de muestreo es L y definiendo la frecuencia de fracturas como λ , entonces se tiene que:

$$\text{Priest y Hudson (1976): } \lambda = \frac{\text{nº de discontinuidades}}{L} \text{ (discontinuidad / metro)}$$

Así mismo sabemos que la separación media $\bar{X}$, entre fracturas estará dada por:

$$\bar{X} = \frac{1}{\lambda}$$

Para cada uno de los sectores en estudio se tendrá:

Tabla15
Longitudes por Sectores y set

Sector	Set	Nº fracturas	λ (ff/m)	$\bar{x}$ (m)	Longitud (m)	% de ℓ
01	01	118	5.73	0.174	20.6	42
01	02	58	5.73	0.174	10.1	20
01	Aleatorio	108	5.73	0.174	18.8	38
Subtotal ℓ sector 01					49.5	100
02	01	77	4.24	0.236	18.2	36
02	Aleatorio	135	4.24	0.236	31.8	64
Subtotal ℓ sector 02					50.0	100
03	01	168	8.08	0.124	20.8	42
03	02	144	8.08	0.124	17.8	35
03	Aleatorio	92	8.08	0.124	11.4	23
Subtotal ℓ sector 03					50.0	100

Fuente: Elaboración propia

Nota: Valores observados en campo por set/sector. $\lambda_{\text{obs}} = N/Ly$ $\bar{x}_{\text{obs}} = 1/\lambda_{\text{obs}}$ se calculan con la longitud geométrica muestreada

Precisión de la media de la media, de acuerdo con procedimientos estadísticos estándar y basado en el teorema del límite central, la media $\frac{1}{\lambda}$, y su desviación estándar, tienden a ser una función de distribución normal con un error estándar $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ que para $n > 30$, se hace casi normal entonces se tendrá que:

$$\varepsilon = \frac{+ z\sigma}{-\sqrt{n}}$$

De tal manera que el valor más probable del valor medio se encontrara entre los rangos de:

$\bar{X} \pm \varepsilon$ (error)

Expresándose para diversos niveles de confianza como.

$$P\left(\bar{X} - \frac{Z\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{Z\sigma}{\sqrt{n}}\right) 0.95$$

Donde ε , es el error, Z es un valor obtenido de tablas de distribución normal estandarizada, y para el 95% de confiabilidad es 1.960, σ es la desviación estándar muestral, y n es número de muestras para nuestro caso fracturas.

Con estas consideraciones se tiene los valores

Para sector 01

$$P\left(\frac{Z*\sigma}{\sqrt{n}} - \bar{X} \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{Z*\sigma}{\sqrt{n}}\right) 0.95 \text{ luego } P(0.172 \leq 0.174 \leq 0.191) * 0.95; \text{ es decir tenemos la}$$

seguridad al 95% de confiabilidad que el valor del espaciamiento medio entre fracturas en el sector 01, oscila entre estos rangos con 0.172 como límite inferior y 0.191 como límite superior.

Para sector 02

$$P\left(\frac{Z*\sigma}{\sqrt{n}} - \bar{X} \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{Z*\sigma}{\sqrt{n}}\right) 0.95 \text{ luego } P(0.199 \leq 0.236 \leq 0.259) 0.95; \text{ es decir tenemos la}$$

seguridad al 95% de confiabilidad que el valor del espaciamiento medio entre fracturas en el sector 01, oscila entre estos rangos con 0.199 como límite inferior y 0.259 como límite superior.

Para sector 03

$$P\left(\frac{Z*\sigma}{\sqrt{n}} - \bar{X} \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{Z*\sigma}{\sqrt{n}}\right) 0.95 \text{ luego } P(0.102 \leq 0.124 \leq 0.126) 0.95; \text{ es decir tenemos la}$$

seguridad al 95% de confiabilidad que el valor del espaciamiento medio entre fracturas en el sector 01, oscila entre estos rangos con 0.1022 como límite inferior y 0.126 como limite superior.

Dada las características del estudio, con un dominio de fracturas tan amplio, se evaluó la función densidad de probabilidad que sigue el espaciamiento, se encontró que para el sector

01 es exponencial, que coincide con diversos autores Priest (1976); Hudson (1979); Wallis (1980)

5.1.6 Prueba de hipótesis

Las características que presentan los tres sectores principales del macizo rocoso de acuerdo con el procesamiento de datos obtenidos en campo y procesados mediante el software Minitab v22, para confirmar o desestimar la hipótesis de distribución de espaciamientos del macizo rocoso en la zona de San Jerónimo – Paruro km.12; se puede establecer lo siguiente:

Planteamiento de hipótesis para sector 01 para el espaciamiento de fracturas

- **H₀:** Los valores del espaciamiento de fracturas del macizo rocoso que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12; - sector 01 no se distribuyen según una distribución exponencial.
- **H_a:** Los valores del espaciamiento de fracturas del macizo rocoso que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12; - sector 01 se distribuyen según una distribución exponencial.

Regla de decisión o región crítica

- Si $p\text{-valor} \leq \alpha$ entonces se RECHAZA la H₀, caso contrario se acepta la H₀

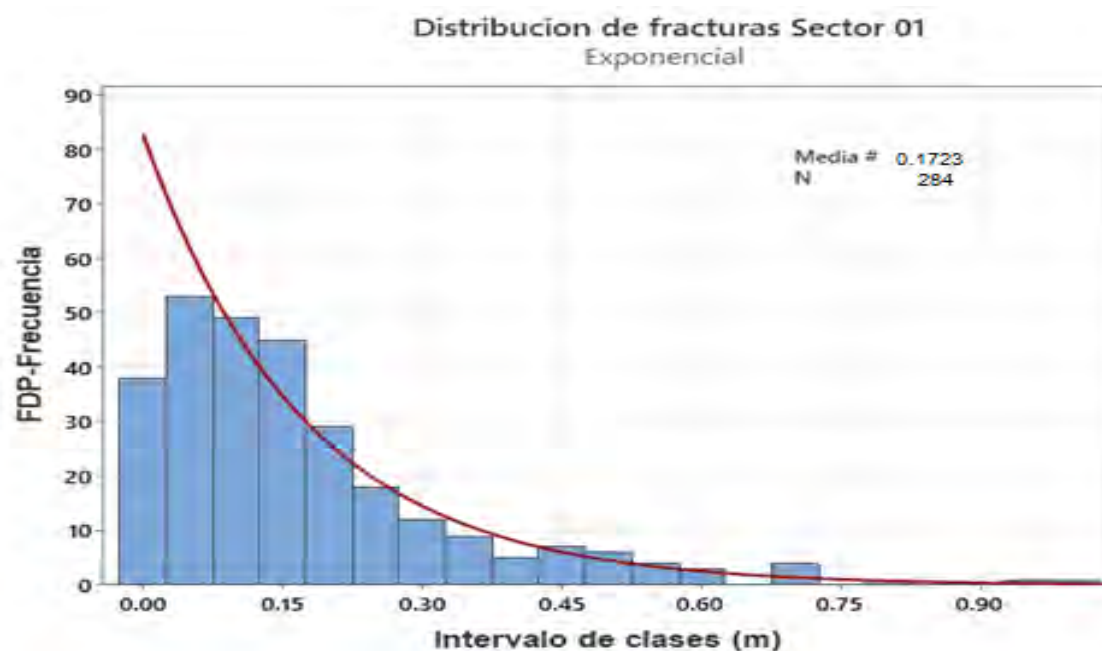
Tabla16
Prueba de Bondad de ajuste y parámetro de distribución

Distribución	Anderson darling	P-valor	Escala
Exponencial	0.493	0.503	0.17226

Dado que en P-valor es mayor al nivel de significación $\alpha = 0.05 = 5\%$; siendo $P\text{-valor} > \alpha$, no existe suficiente evidencia para rechazar la H₀, y en consecuencia se acepta que los valores siguen una función de densidad de probabilidad exponencial.

Los mismos guardan concordancia con lo expresado por diversos autores Priest (1976); Hudson (1979); Wallis (1980)

Figura45
Distribución de espaciamiento de fracturas Sector 01



Planteamiento de hipótesis para sector 02 para el espaciamiento de fracturas

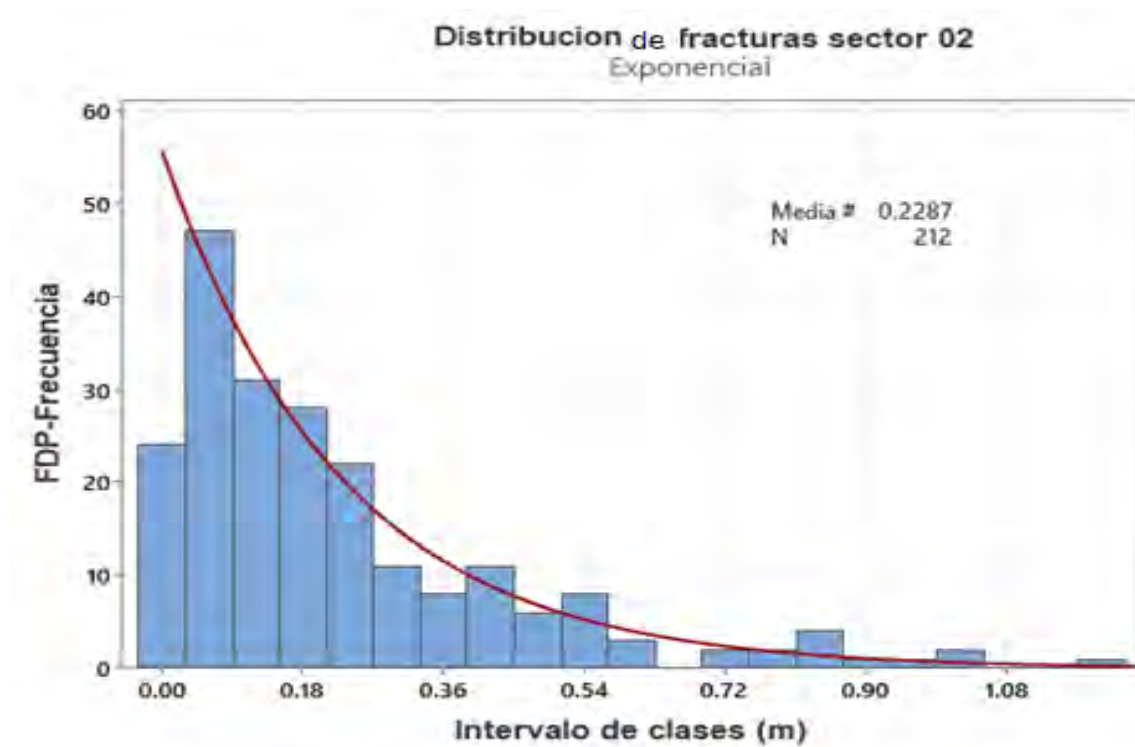
- **H₀:** Los valores del espaciamiento de fracturas del macizo rocoso que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12; - sector 02 no se distribuyen según una distribución exponencial.
- **H_a :** Los valores del espaciamiento de fracturas del macizo rocoso que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12; - sector 02 se distribuyen según una distribución exponencial.
- Si $p\text{-valor} \leq \alpha$ entonces se RECHAZA la H₀, caso contrario se acepta la H₀

Tabla17
Prueba de Bondad de ajuste y parámetro de distribución

Distribución	Anderson darling	P-valor	Escala
Exponencial	0.277	0.877	0.22873

Dado que en P-valor es mayor al nivel de significación $\alpha = 0.05 = 5\%$; siendo $P\text{-valor} > \alpha$, no existe suficiente evidencia para rechazar la H_0 , y en consecuencia se acepta que los valores siguen una función de densidad de probabilidad exponencial.

Figura46
Distribución de espaciamiento de fracturas Sector 02



Planteamiento de hipótesis para sector 03 para el espaciamiento de fracturas

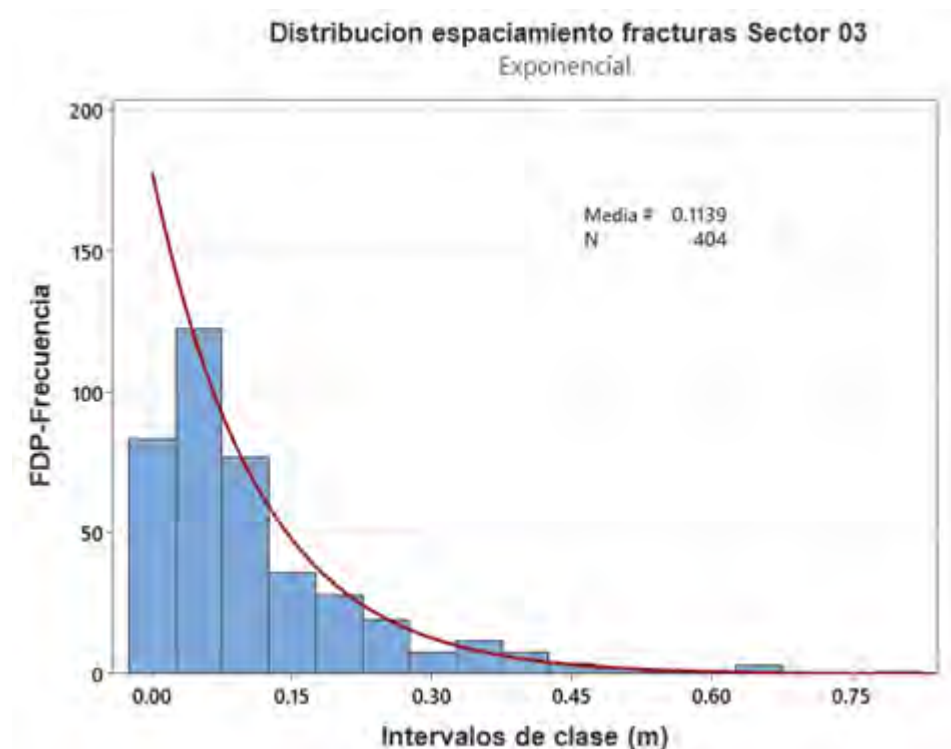
- **H_0 :** Los valores del espaciamiento de fracturas del macizo rocoso que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12; - sector 03 no se distribuyen según una distribución exponencial.
- **H_a :** Los valores del espaciamiento de fracturas del macizo rocoso que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12; - sector 03 se distribuyen según una distribución exponencial.
- Si $p\text{-valor} \leq \alpha$ entonces se RECHAZA la H_0 , caso contrario se acepta la H_0

Tabla18
Prueba de Bondad de ajuste y parámetro de distribución

Distribución	Anderson darling	P-valor	Escala
Exponencial	0.624	0.348	0.11390

Dado que en P-valor es mayor al nivel de significación $\alpha = 0.05 = 5\%$; siendo $P\text{-valor} > \alpha$, no existe suficiente evidencia para rechazar la H_0 , y en consecuencia se acepta que los valores siguen una función de densidad de probabilidad exponencial.

Figura47
Distribución de espaciamiento de fracturas Sector 03



5.2 Interpretación de resultados del RQD sin sondeo

De acuerdo con Priest y Hudson (1976), quienes luego de múltiples investigaciones, en las que utilizaron el levantamiento de información a través de la línea de muestreo "Scan Line", proponen una correlacionaron entre la frecuencia de fracturas (densidad de fracturas), a lo largo de la línea de muestreo λ_i , con el RQD, luego de verificar como ya se mencionó que estas siguen de cerca una distribución exponencial negativa.

Tomando en consideración los datos del muestreo para los tres sectores de estudio (01,02 y 03), sin sondeo y considerando el procedimiento de cálculo para este tipo de procesos, tenemos los siguientes resultados de cálculo, usando la formula definida:

$$RQD_{\lambda} = 100e^{-0.1\lambda_i} (0.1\lambda_i+1).$$

donde el valor de constante neperiano (e) tiene un valor de 2.7182818285.y

λ_i la densidad o frecuencia de fracturas por metro en cada sector o set encontrados en los tres sectores.

El cálculo de RQD para el procesamiento un total de 149,5 m. lineales, entre los tres sectores consideran 900 datos de discontinuidades de acuerdo con la tabla 13.

Tabla19
Cálculo de las discontinuidades del RQD sin sondeo

Sector	Set	N.º	L _i	λ_i	$RQD_{\lambda_i}=100e^{-0.1\lambda_i}(0.1\lambda_i+1)$
		Discontinuidades	Metros	ff/m	%
01	01	118	13.6	8.67	$RQD_{\lambda_1} = 78.4$
	02	58	19.9	2.91	$RQD_{\lambda_2} = 96.5$
	Ale	108	16.0	6.75	$RQD_{\lambda_3} = 85.3$
02	01	77	7.0	11.0	$RQD_{\lambda_1} = 69.9$
	Ale	135	43.0	3.10	$RQD_{\lambda_2} = 96.1$
03	01	168	14.7	11.43	$RQD_{\lambda_1} = 68.3$
	02	144	14.7	9.79	$RQD_{\lambda_2} = 74.3$
	Ale	92	20.6	4.46	$RQD_{\lambda_3} = 92.6$

Nota: Se aplica una corrección por sesgo del método de línea, que subrepresenta las fracturas cortas. En función de ello, se ajusta la densidad y se informa un RQD corregido, considerado más fiel a la condición del macizo. La Tabla 15 consigna el dato observado; la Tabla 19, el observado con corrección, por lo que no procede una comparación directa valor a valor.

Sabiendo que el espaciamiento medio entre fracturas esta dado por:

$$\bar{X} = \frac{1}{\lambda_i}$$

Se obtiene para los tres sectores y para cada, subsectores identificados en forma de sets e integrantes, de los mismos los valores de sus espaciamentos medios, para relacionarlos además a la tabla 02 y la tabla 01 con el RQD, para cada subsector en particular se tendrá:

Tabla20
Calificación de Sectores y Sets identificados

Sector	Set	Espaciamiento m Tabla 02	Calificación Cualitativa Tabla 02	Calificación Tabla 01	Calificación Cualitativa Tabla 01
01	01	0.115	Cerrado	$RQD_{\lambda_1} = IV$	Buena
	02	0.343	Moderado cerrado	$RQD_{\lambda_2} = V$	Muy Buena
	Ale	0.148	Cerrado	$RQD_{\lambda_3} = IV$	Buena
02	01	0.090	Cerrado	$RQD_{\lambda_1} = III$	Media
	Ale	0.322	Moderado Cerrado	$RQD_{\lambda_2} = V$	Muy Buena
	01	0.090	Cerrado	$RQD_{\lambda_1} = III$	Media
03	02	0.102	Cerrado	$RQD_{\lambda_2} = III$	Media
	Ale	0.224	Cerrado	$RQD_{\lambda_3} = V$	Muy Buena

Fuente: Elaboración propia

Nota: Detalle del cálculo del RQD sin sondeo del número de discontinuidades y su valoración cualitativa haciendo uso de las tablas 01 (Bieniawski) y 02 (Terzaghi)

Según lo precisado en el cálculo del RQD, podemos ver que los resultados obtenidos para las tres familias principales y sets, que integra el área rocosa:

- El primer Sector, constituido por tres subsectores, Set 01, Set 02 y Aleatorio, tienen valores de RQD_{λ_1} 78.40%, RQD_{λ_2} ,96.5% y RQD_{λ_a} 85.3%, respectivamente, lo cual permite señalar que la fracturación del macizo rocoso está dentro del parámetro de calidad de roca (**Tabla 01**), Cualitativamente del tipo IV y V o Macizo rocoso calificado “Bueno a muy Bueno”, con rango de variación de 78.4% a 96.5% es decir 22.1% de

fluctuación para 49.5 metros de longitud de línea de muestreo, además de acuerdo a la clasificación de los espacios de discontinuidad (**Tabla 2**) se encuentra en el criterio de “Espacios Cerrados” a “Espacios moderados” cuyos espaciamientos van de 50-1000 mm, Con un rango de fluctuación de 222 mm , entre los valores reales hallados, dando un macizo rocoso de fracturado a bloques según (**Tabla 02**), de igual manera para los 49.5 metros de línea de muestreo.

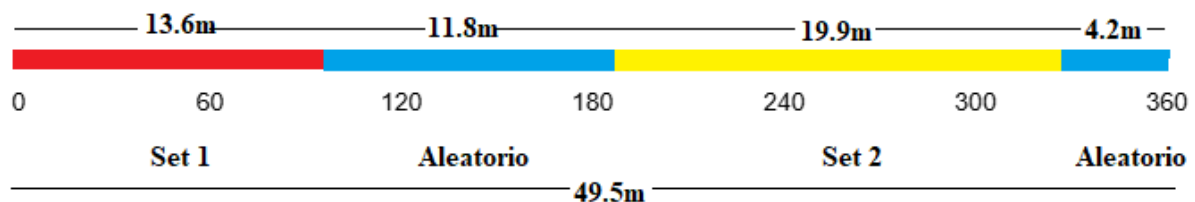
- El segundo Sector, constituido por dos subsectores, Set 01, y Aleatorio, tienen valores de RQD_{λ_1} 69.90 %, y RQD_{λ_a} 96.10%, respectivamente, lo cual permite señalar que la fracturación del macizo rocoso está dentro del parámetro de calidad de roca (**Tabla 01**), Cualitativamente del tipo III y V o Macizo rocoso calificado “Medio a muy Bueno”, con rango de variación de 69.90 % a 96.10 % es decir 26.2% de fluctuación, para 50.0 metros de longitud de línea de muestreo, además de acuerdo a la clasificación de los espacios de discontinuidad (**Tabla 2**) se encuentra en el criterio de “Muy Cerrados” a “Espacios moderados” cuyos espaciamientos van de 50-1000 mm, Con un rango de fluctuación de 230 mm, entre los valores reales hallados, dando un macizo rocoso de Molido a Bloques según (**Tabla 02**), de igual manera para los 50.0 metros de línea de muestreo.
- El primer Sector, constituido por tres subsectores, Set 01, Set 02 y Aleatorio, tienen valores de RQD_{λ_1} 68.30%, RQD_{λ_2} ,74.3% y RQD_{λ_a} 92.6%, respectivamente, lo cual permite señalar que la fracturación del macizo rocoso está dentro del parámetro de calidad de roca (**Tabla 01**), Cualitativamente del tipo III , III y V respectivamente o Macizo rocoso calificado de “Bueno”, a “ Muy bueno”, con rango de variación de 68.30% a 92.60% es decir 24.3% de fluctuación para 50.0 metros de longitud de línea de muestreo, además de acuerdo a la clasificación de los espacios de discontinuidad (**Tabla 2**) se encuentra en el criterio de “Espacios Cerrados” cuyos espaciamientos van

de 50-1000 mm, Con un rango de fluctuación de 130 mm , entre los valores reales hallados, dando un macizo rocoso de fracturado según (**Tabla 02**), de igual manera para los 50.0 metros de línea de muestreo.

Todo lo descrito puede ser resumido en los siguientes gráficos esquemáticos, que dan una idea de la distribución espacial de las diferentes variables como, longitud de Set en el frente de muestreo, así como la asociación a los mismos de los parámetros específicos para cada set, y cada sector así como sus respectivos valores del RQD, densidad de fracturas, y espaciamiento medio de cada set y sector.

<u>Sector 01</u>		
D=118	D=108	D=58
$\bar{X}=0.115m$	$\bar{X}=0.148m$	$\bar{X}=0.343m$
RQD=78.8%	RQD=85.3%	RQD=96.5%
$\lambda=8.67$	$\lambda=6.75$	$\lambda=2.91$

Figura48
Distribución espacial de longitudes y parámetros para sector1,set1 y set 2 y aleatorio



Fuente: Elaboración propia

D: Discontinuidades

- El primer sector, presenta dos sets (Set1 y Set 2), “rojo y amarillo”, en el gráfico. Así como un sector aleatorio “azul”, el set 1 está separado por un sector aleatorio es decir muy disperso, lo suficiente como para no haber constituido otro set, con 108 discontinuidades pero no centralizadas alrededor de una preferencia, que muestre un

dominio estructural, desde el punto de vista de las fracturas, este sector aleatorio se presenta en dos tramos desde los 13.6 m hasta los 25.4m el primero y desde 45.3m hasta los 49.5m, finalizando el sector 01, el sector aleatorio sin embargo tiene una calificación de macizo rocoso como bueno, se concluye que para esta extensión se tiene dos calidades que van desde “bueno a muy bueno”, importante destacar que el valor muy bueno se encuentra entre dos valorizaciones buenas con menor cuantía de RQD, pudiendo indicara las preferencias de deformación rocosa expresada por las fracturas, dejando una especie de dique, de mayor calidad entre ambos

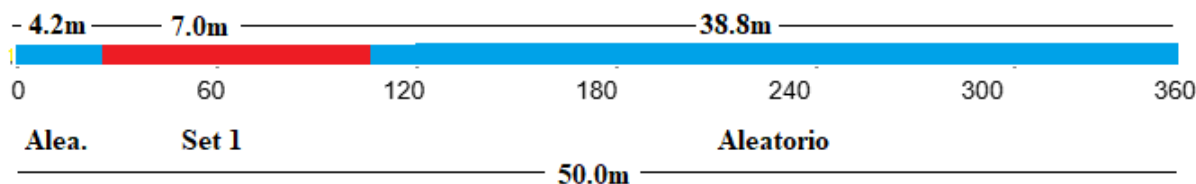
Sector 02

D=77.0m
 $\bar{x}=0.09m$
 RQD=69.9%
 $\lambda=11.0$

D=135.0m
 $\bar{x}=0.322m$
 RQD=96.1%
 $\lambda=3.10$

Figura49

Distribución espacial de longitudes y parámetros para sector 2, set1, set2 y aleatorio



Fuente: Elaboración propia

- El segundo sector, presenta solamente un set (Set1), “rojo”, en el gráfico. Así como un sector aleatorio “azul”, el set 1 así como se muestra, está separando por un amplio sector aleatorio muy disperso, al interior de un sector que definitivamente tiene predominancia dispersa, lo suficiente como para no haber constituido otro set, con 135 discontinuidades pero no nucleadas alrededor de una preferencia, que muestre un dominio estructural, desde el punto de vista de las fracturas, este sector aleatorio se presenta en dos tramos desde los 49.5m hasta los 53.7m el primero y desde 60.7m hasta los 99.5m, finalizando el sector 02, el sector aleatorio sin embargo tiene una calificación

de macizo rocoso de buena para el único set, a muy bueno, para el sector aleatorio importante destacar que el sector 1 concluye en un sector aleatorio de 4.2m y el sector 2 inicia su secuencia igualmente con un sector aleatorio “Azul”, de 4.2m, que es coherente dado que es el macizo es un continuo, siendo la longitud de muestreo, la variable, que por su puesto era imposible el visualizar a priori, hasta confrontar estos resultados el valor bueno del set1, se encuentra entre dos sectores muy buenos que corresponde a la coloración “azul”, la valoración de muy buena pese a no formar un set formalmente se debería fundamentalmente a su gran extensión entro del conjunto representa el 86% de toda la longitud muestreada, el pequeño tramo al inicio del sector 2, lo más probable como ya se mencionó, sea la continuación del último tramo (4.5m), del sector 1 el sector pasa de tener una valoración buena para único set a muy buena para el sector aleatorio, pudiendo indicar que a lo largo de este sector no existieron preferencias de deformación rocosa expresada por las fracturas.

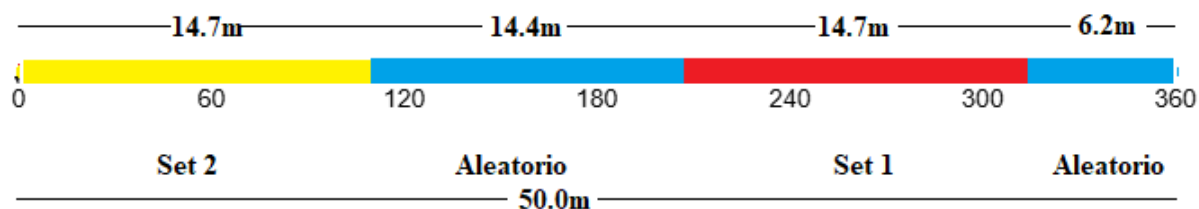
- El segundo sector, presenta solamente un set (Set1), “rojo”, en el gráfico. Asi como un sector aleatorio “azul”, el set 1 asi como se muestra, está separando por un amplio sector aleatorio muy disperso, al interior de un sector que definitivamente tiene predominancia dispersa, lo suficiente como para no haber constituido otro set, con 135 discontinuidades pero no nucleadas alrededor de una preferencia, que muestre un dominio estructural, desde el punto de vista de las fracturas, este sector aleatorio se presenta en dos tramos desde los 49.5m hasta los 53.7m el primero y desde 60.7m hasta los 99.5m, finalizando el sector 02, el sector aleatorio sin embargo tiene una calificación de macizo rocoso de buena para el único set, a muy bueno, para el sector aleatorio importante destacar que el sector 1 concluye en un sector aleatorio de 4.2m y el sector 2 inicia su secuencia igualmente con un sector aleatorio “Azul”, de 4.2m, que es coherente dado que es el macizo es un continuo, siendo la longitud de muestreo, la

variable, que por su puesto era imposible el visualizar a priori, hasta confrontar estos resultados el valor bueno del set1, se encuentra entre dos sectores muy buenos que corresponde a la coloración “ azul”, la valoración de muy buena pese a no formar un set formalmente se debería fundamentalmente a su gran extensión entro del conjunto representa el 86% de toda la longitud muestreada, el pequeño tramo al inicio del sector 2, lo más probable como ya se mencionó, sea la continuación del último tramo (4.5m), del sector 1 el sector pasa de tener una valoración buena para único set a muy buena para el sector aleatorio, pudiendo indicar que a lo largo de este sector no existieron preferencias de deformación rocosa expresada por las fracturas.

Sector 03		
D=168 m	D=144 m	D=92 m
$\bar{X}=0.102\text{m}$	$\bar{X}=0.224\text{m}$	$\bar{X}=0.09\text{m}$
RQD=74.3%	RQD=92.6%	RQD=68.3%
$\lambda=9.79$	$\lambda=4.46$	$\lambda=11.43$

Figura50

Distribución espacial de longitudes y parámetros para sector 3, set1, set2 y aleatorio



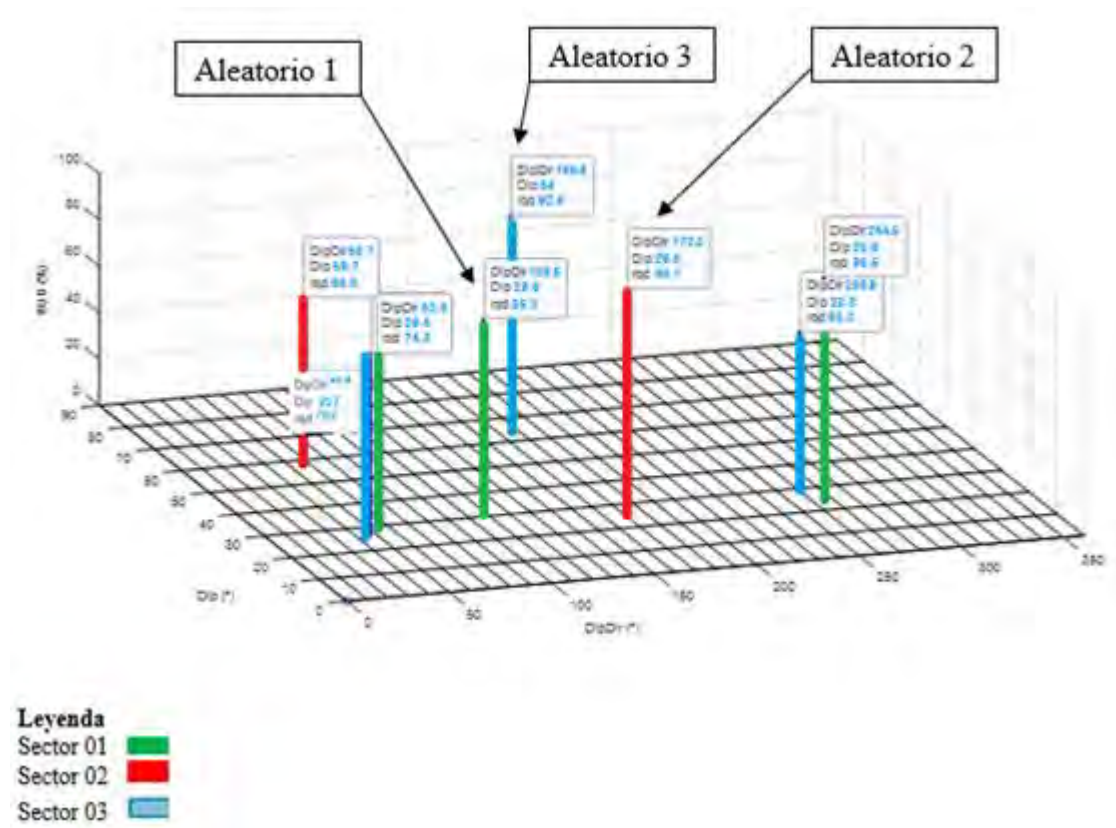
Fuente: Elaboración propia

- El tercer sector, presenta dos sets (Set1, Set 2), “rojo y amarillo”, en el gráfico respectivamente. Así como un sector aleatorio “azul”, el set 1 se encuentra en el extremo derecho y hacia la parte terminal de la longitud muestreada con un alto índice de densidad de fracturas, $\lambda_1 = 11.43$ similar a la densidad del set 1 del sector 2 con $\lambda_1 = 11.0$, como se muestra en el gráfico, su extensión es igual al set 2 y es 14.7 m, y aunque en ambos casos el set 1 y 2 tienen la misma denominación de macizo rocoso como medio, atendiendo a sus frecuencias de fracturas está claro que el sector 01 tiene mayor densidad por metro, esto debido a que el RQD, considera rangos de valoración en los que están contenidos ambos sets, **Tabla 01** (51% -

75%), estos dos sets, (set1 y sets2), están separados por un sector aleatorio de similar longitud muy, pero con calificación de muy bueno, solo 92 discontinuidades pero no nucleadas alrededor de una preferencia, lo que explicaría la valoración más alta del RQD, para este tramo de similar longitud con sus vecinos derecho e izquierdo, desde el punto de vista de las fracturas, este sector aleatorio se presenta en dos tramos desde los 114.2m hasta los 128.6m el primero y desde 143.0 m hasta los 149.5 m, el sector aleatorio del sector 2 concluye la línea de muestreo, y el sector 03 inicia con el set 02 con una notoria variación en la calificación del RQD descendiendo de muy buena a buena esto se repite inclusive para el set 1, del sector 3, manteniendo la calificación de muy buena para los dos sectores 2 y 3 respectivamente, y una calificación de macizo rocoso de calidad, muy bueno, para el sector aleatorio importante destacar este sector 3 , es el único que tiene para dos sets, la misma calificación (bueno), para ambos.

Figura51

Distribución espacial de parámetros del macizo rocos RQD, Dipdir y Dip para los tres sectores 01,02 y 03



Nota: vista isométrica de distribución espacial de los valores RQD.

Fuente: Elaboración propia

En esta última imagen (**fig.46**), se puede ilustrar de manera más grafica una imagen tridimensional isométrica que une los tres parámetros, el RQD, por cada sector de muestreo Sector 01, Sector 02 y Sector 03, y su relacion de manera individual por Sectores y entre los tres sectores, se puede ver una clusterizacion (concentración),de valores en dos sectores en los dos casos integrantes de los set 01(Verde) y set 3 (azul), con valores muy próximos en Dirección de Buzamiento con un rango de diferencia entre ambos de 7.5° y Dip, con variación de 3.8° tan próximos que casi se solapan, es de destacar que rango de RQD, es de 78.8% para Set1 y 74.3% para set 2 del sector 3 con rqd con una diferencia de 4.5% con calificación IV y cualitativamente la identifica como roca buena para ambos, de igual manera y con los mismos sectores 1 y 3, pero esta vez con el Set 2 del sector 1 y el set 2 del sector 3, con rango de

Dirección de Buzamiento entre ambos de 4.5° y Dip, con variación de 5.2° de igual manera tan próximos que casi se solapan, con valores del RQD, para set 2 del sector 01 de 96.5% y una calificación de V, y denominación de calidad de roca muy buen , así como para el Set 1 del sector 03 un RQD, 68.3% con calificación III o roca de calidad media siempre con referencia en todos los casos de la **Tabla 01**, esta alta discrepancia a pesara de la coincidencia de orientaciones de ambas variables a saber (dirección de buzamiento y Buzamiento), no es necesariamente suficiente para dar valoraciones del rqd, similares y es si observamos la (fig.43), consecuencia de la densidad de fracturas para ambos sets, mientras en el set 02 del sector 01 la densidad $\lambda_2 = 2.91$ en el set 1 del sector 03 es $\lambda_1=11.43$.

Es destacable también lo observado con la distribución de los valores aleatorios para los tres sectores, tanto para el sector 01 , 02 y 03 su distribución espacial aislada de los valores rqd, de los set para todos los casos, 85.3% para el sector 1 y 96.1% y 92.6% para los sectores 02 y 03 respectivamente con calidad de roca IV, buena a V para sector 2 y 3 o roca muy buena siendo los valores más altos de los tres sectores esto se puede explicar por lo distribución extensa en el talud, es decir no tienen preferencia mayoritaria y por lo mismos sus densidades son $\lambda_a=6.75$, para sector 01 $\lambda_a= 3.10$ para sector 02 y $\lambda_a=4.46$ y estos como se explicó por la dispersión de sus valores.

5.2.1 *Origen del sesgo.*

Al desarrollar una línea de muestreo, como se desarrolló en el presente trabajo, se realizara en realidad una censo de todas y cada una de las discontinuidades de roca que intercepta a los largo de la misma, pero está siendo exhaustiva de todas maneras no considera las discontinuidades que no la intercepta, es evidente que la mayor probabilidad de ser considerada un discontinuidad es cuando esta es más larga o más persistente, por supuesto las discontinuidades más pequeñas tienen menor probabilidad de ser interceptadas, de tal manera

que las fracturas cortas son subrepresentadas, como se puede ver en el esquemático fig. N° 47, gráfico fig.47

Los valores que se pudieron observar hasta ahora es que los espaciamiento y persistencias se distribuyen siguiendo un patrón exponencial y log normal, respectivamente. Lo antes expresado es confirmado por los autores (Baecher, Lanney y Eistein, 1977; Lanney, 1978) en el que se analizaron 6000 diacласas. Además (ej., Agterberg, 1974) señala que la distribución exponencial del espaciamiento así como también la distribución logarítmica de las persistencias son consistentes con una amplia literatura de análisis estadístico de datos en geología.

Los sesgos de muestreo en especial en la técnica de línea de muestreo o “scanline” respecto a la longitud de trazas han sido analizados en la literatura por Robertson (1970) y Cruden (1977), entre otros. Ambos autores identifican correctamente los sesgos asociados con observaciones incompletas.

5.2.2 *Análisis de la persistencia de los macizos rocosos*

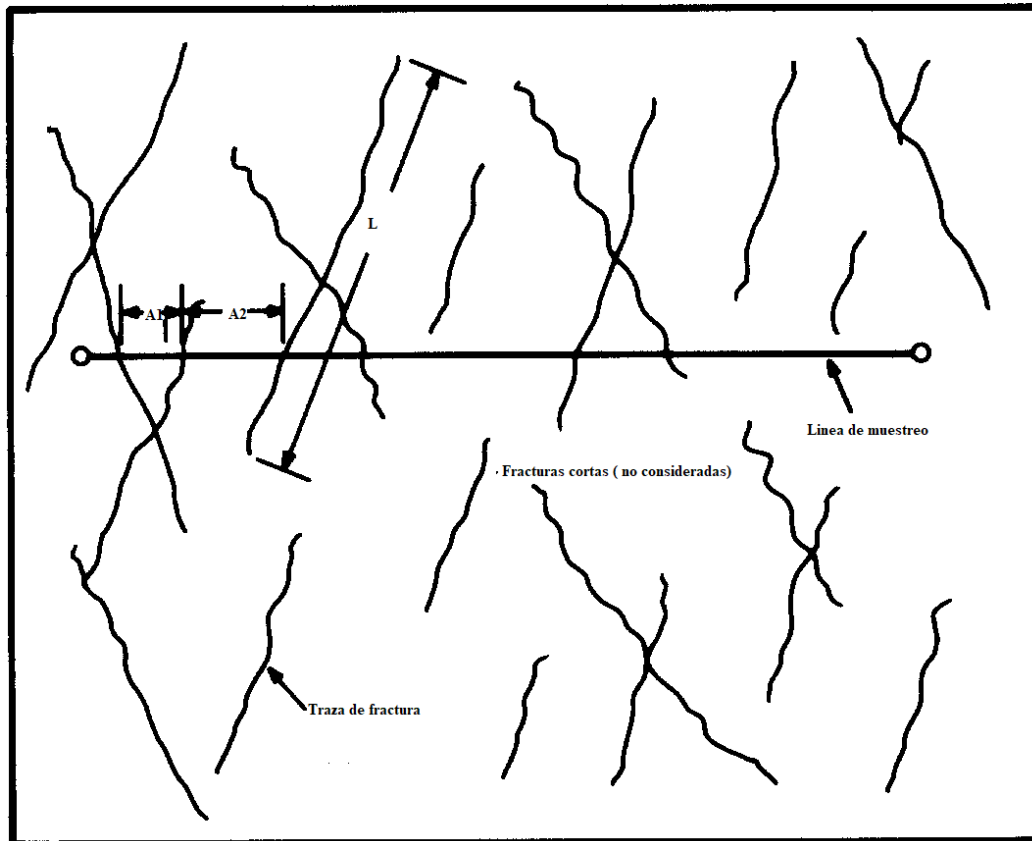
Las longitudes de las discontinuidades, se cuantifica a partir de la medición de la intersección con las líneas de muestreo en ambas direcciones por encima de la línea de muestreo y por debajo, Tomando las intercepciones de todas las discontinuidades y de acuerdo con la clasificación recomendada por Priest y Hudson (1976) para calcular el RQD y de Sjögren (1979) y Palmstron (1995), quienes permiten establecer el cálculo y la calidad rocosa en el RQD.

Según Rives (1992) las dos principales formas de distribución de espaciamiento y longitud de las discontinuidades son la exponencial negativa o log normal respectivamente.

Al desarrollar una línea de muestreo, como se desarrolló en el presente trabajo, se realizara en realidad un censo de todas y cada una de las discontinuidades de roca que intercepta a lo largo de la misma, pero está siendo exhaustiva de todas maneras no considera las discontinuidades que no la intercepta, es evidente que la mayor probabilidad de ser

considerada un discontinuidad es cuando esta es más larga o más persistente, por supuesto las discontinuidades más pequeñas tienen menor probabilidad de ser interceptadas, de tal manera que las fracturas cortas son subrepresentadas, como se puede ver en un gráfico esquemático a continuación.

Figura52
Sesgo de muestreo en la longitud de las discontinuidades.



Nota: Grafico esquema que ilustra porque las discontinuidades más cortas tienen menos posibilidades de ser representadas adecuadamente.

Fuente: Elaboración propia

Origen del sesgo:

La probabilidad de que una fractura de longitud L_f intercepte una scanline de longitud L_s , dependerá de su tamaño. Para fracturas aleatorias en orientación y posición, la probabilidad de intersección es aproximadamente:

$$P(\text{intersección}) = \frac{L_f}{L_s + L_f} \quad (\text{Priest, 1997})$$

Para $L_f \ll L_s$ (fracturas pequeñas), se simplifica a:

$$P(\text{interseccion}) \approx \frac{L_f}{L_s}$$

La distribución observada de longitudes ($f_{\text{obs}}(L_f)$) es una versión sesgada de la distribución real ($f_{\text{real}}(L_f)$):

$$f_{\text{obs}}(L_f) \propto L_f * f_{\text{real}}(L_f)$$

la corrección de la distribución de persistencia (log normal) estará dada:

$$f_{\text{real}}(L_f) = \frac{f_{\text{obs}}(L_f)}{L_f} * \frac{1}{C}$$

Donde C, es una constante dada por:

$$C = \int_0^{\alpha} \frac{f_{\text{obs}}(L_f)}{L_f} * dL_f$$

Y por la derivación de Priest & Hudson se tendrá que:

$$\lambda_{\text{real}} = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{E(L_f)/(L_s + E(L_f))}$$

En resumen, será:

$$\lambda_{\text{real}} = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{[1 - E(P(\text{Interseccion FDP Lognormal y FDP Exponencial}))]}$$

La intersección de las dos funciones de distribución, serán desarrolladas por métodos numéricos.

Así se tiene para cada sector 01,02 y 03 tendremos:

Tabla21
Calificación de Sectores y Sets identificados

Sector Nº	Set Nº	Discontinuidades Nº	λ_c ff/m	RQDc %	Calidad Rango	Calificación Descriptiva
01	01	241	17.7	47.1	II	Muy malo
	02	115	5.8	88.5	IV	Bueno
	A	618	38.6	10.2	I	Muy malo
02	01	124	17.7	47.1	II	Malo
	A	229	5.3	90.0	IV	Bueno
	01	339	23.1	32.9	II	Malo
03	02	291	19.8	41.2	II	Malo
	A	178	8.6	78.6	IV	Bueno

Nota: Detalle del cálculo del RQDc sin sondeo del número de discontinuidades y su valoración cualitativa haciendo uso de las tablas 01 (Bieniawski) y 02 (Terzaghi)

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el cuadro, existe un descenso tanto en la calidad del RQDc y la Calificación cualitativa del mismo, esto por su puesto debido a la consideración por ajuste de las fracturas omitidas por sesgo.

Es bueno realizar las siguientes consideraciones:

1ro. - la línea de muestreo "scan line", es solo una línea que atraviesa las caras del talud, de tal manera que hipotéticamente y desde un punto de vista estrictamente matemático, podrían existir infinitas rectas en la superficie del talud en estudio.

2do. - los valores de las intersecciones (con la línea de muestreo), entonces son una realización muy particular de las variables aleatorias constituyendo, un fenómeno netamente aleatorio, cuyas componentes tanto en orientación (Dip dir, y Dip), así como la extensión (persistencia), con las discontinuidades, por tanto estos serán muestras de un gran dominio que está limitado por el talud, y las muestras consideradas en el estudio, son sub conjuntos de la población en estudio, esta corrección entonces nos aproxima más a tener un valor próximo a la realidad que como ingenieros deseamos.

Por criterios operativos y geometría del área de estudio, (es una curva, que obliga a dividir las áreas), este fue sectorizado en tres tramos (sector 01,02 y 03), pero el macizo rocoso está constituido geológicamente en el mismo tipo de roca (arenisca) e incluso en la misma formación (capas rojas, formación san jerónimo), por tanto, es importante determinar si los elementos motivos de estudio guardan o no similitud entre los tres sectores en estudio.

Planteamiento de hipótesis.

H_0 = las medianas de los sectores 01, 02 y 03, son iguales

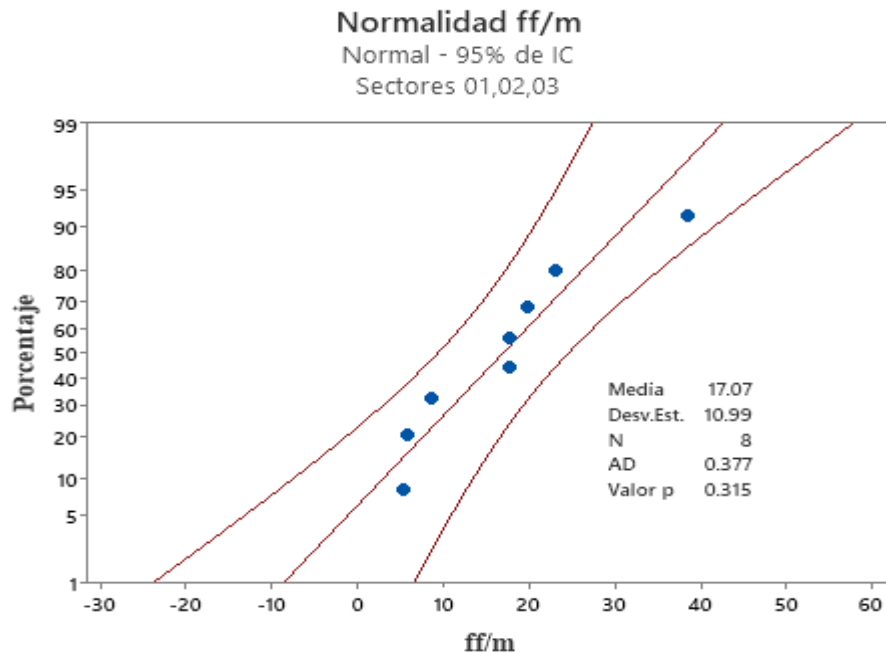
H_1 = no todas las medianas de los sectores 01,02 y 03, son iguales.

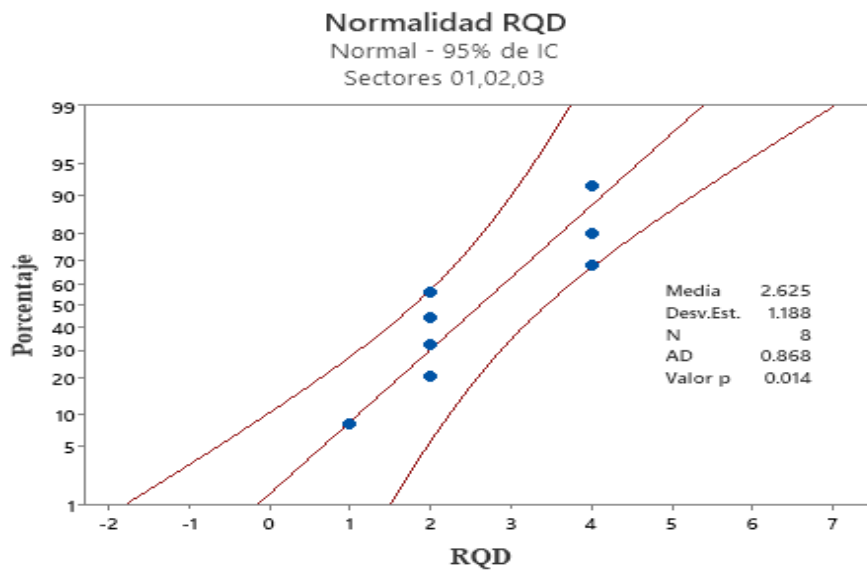
NC: 95%

α : 5%

Verificación de supuestos:

Figura53
Normalidad ff/m





Prueba ANOVA:

Tabla22

Prueba de Kruskal-Wallis: RQD vs.FF/M

Estadísticas descriptivas

FF	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
5.3	1	2.0	3.5	-0.44
5.8	1	2.0	3.5	-0.44
8.6	1	4.0	7.0	1.09
17.7	2	1.5	2.3	-1.50
19.8	1	4.0	7.0	1.09
23.1	1	4.0	7.0	1.09
38.6	1	2.0	3.5	-0.44
General	8		4.5	

Prueba

Hipótesis nula	H_0 : Todas las medianas son iguales		
Hipótesis alterna	H_1 : Al menos una mediana es diferente		
Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	6	5.31	0.504
Ajustado para empates	6	6.38	0.383

Siendo $p > \alpha$, se concluye que no existe suficiente evidencia la 95% del nivel de confianza para suponer que las medianas de las discontinuidades de los sectores 01,02 y 03 no sean iguales.

Luego de ver los resultados estadísticos se realizara entonces una evaluación del conjunto de los tres sectores y sus parámetros respecto a sus frecuencia de fracturas y RQD.

5.3 Determinación de interacción de los set.

En páginas anteriores, se determinó como parte del estudio de las discontinuidades, en los tres sectores en que se segmentó el área de estudio, los sets que para cada sector (01, 02 y 03), en estos además se identificaron, sus características, como frecuencia de fracturas por metro (densidad lineal de fracturas), su espaciamiento promedio, sus orientaciones preferentes, así como valoración inicial de los RQD, en escala cualitativa como Ordinal. De acuerdo con las tablas 01 y 02.

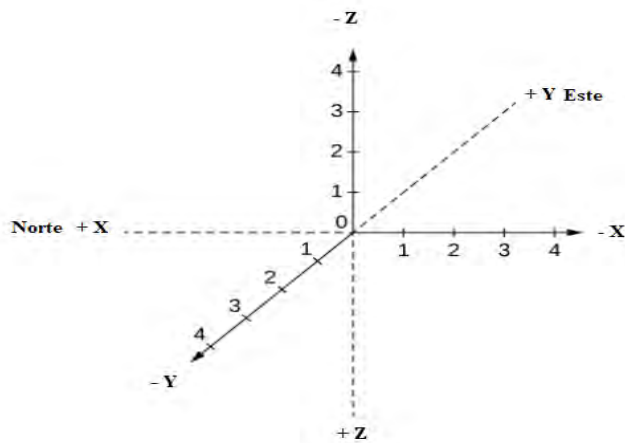
Los Set de cada sector (tres para el sector 01, dos para el sector 02 y tres para el sector 03), cada uno con sus respectivas características geométricas y cuantitativas, considerando que si bien el área de estudio como ya se mencionó se segmentó para su evaluación y posterior evaluación, sin embargo geológicamente es una unidad, desde el punto de vista del tipo de roca, aunque esta claro que ya desde el punto de vista de los dominios geomecánicos (caso RQDs), presenta discrepancias, sin embargo debemos tener en cuenta que las discontinuidades interactúan entre sí, es decir las fracturas son planos que están situados en el espacio y lo que tenemos a través de el muestreo de la línea de detalle (scan line), es una muestra en un plano que nos aproxima a el conocimiento de los mismos.

Los sets ya identificados (en este caso los sets aleatorios, para propósitos prácticos será considerado como el set 03, en dos sectores, y 02 en el sector 02), interactúan entre si (intersecciones), para los cual será necesario plantear algunos aspectos para evaluarlos.

- Las fracturas son planos.
- Una fractura está definida por (Dip dir y por su Dip), para nuestros propósitos en realidad existen más características que no son objeto del estudio.

Para su evaluación se ha considerado un sistema de coordenadas de mano derecha y bajo los criterios normalmente admitidos en geología como se ilustra en la **fig. 48**.

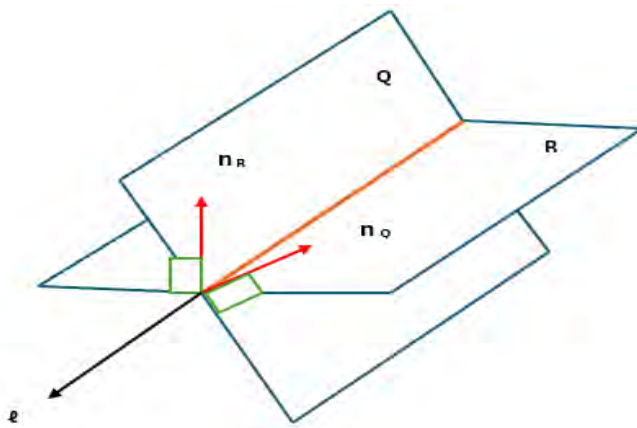
Figura55
Sistema de referencia cartesiano



Nota: Dado que las proyecciones estereográficas están referidas al hemisferio inferior estos son positivos en el eje +Z para guardar coherencia entre gráficos y valoración cuantitativa.

Fuente: Elaboración propia

Figura56
Intersección de dos planos



$n_Q \times n_R$ son vectores perpendiculares a los planos Q y R.

l es la línea perpendicular a n_Q y n_R

Nota: En este grafico esquemático, se ilustra los elementos considerados para la evaluación vectorial de la obtención de la dirección y buzamiento de la intersección entre planos de fracturas

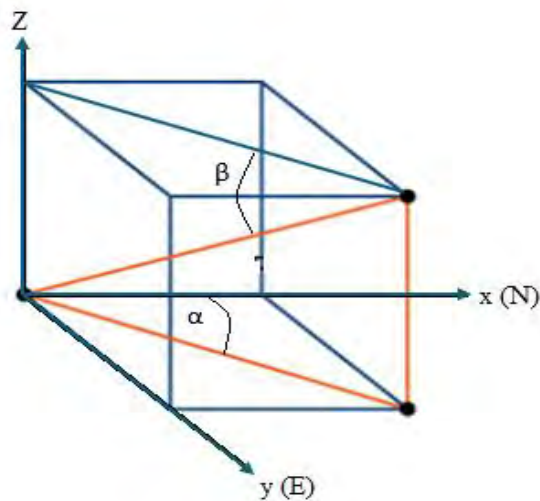
Fuente: Elaboración propia.

Si consideramos que cada plano (fractura), puede ser representado por un vector unitario n_i , que además es ortogonal a cada plano que se intercepta como los planos Q y R, con vectores unitarios y normales n_Q y n_R ; entonces por geometría vectorial sabemos que la recta producto de la intersección de los planos ℓ , podrá ser hallada por el producto cruzado de sus vectores normales.

$$\overline{C} = \overline{Q} \times \overline{R}$$

Figura57

Orientación respecto de las referencias coordenadas.



Nota: las orientaciones de acuerdo con el esquema gráfico de los valores de α = Azimut, así como β = Buzamiento.

Fuente: Elaboración propia.

El vector normal al plano entonces será calculado de acuerdo con (α°) y (β°) por.

$$n = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Sen } \alpha & * \text{ Sen } \beta \\ \text{Cos } \alpha & * \text{ Sen } \beta \\ & \text{Cos } \beta \end{pmatrix}$$

y se adoptaran los signos de las funciones de los componentes de acuerdo con la convención adoptada.

La línea de intersección de los dos planos (ℓ), es perpendicular a ambos vectores normales (n_Q y n_R) por lo tanto su dirección está dada por el producto cruzado de sus vectores normales.

$$\ell = n_Q \times n_R$$

El producto cruzado genera un vector paralelo (ℓ), a la línea de intersección.

Por otra parte, la orientación de la intersección se determinará a partir de la proyección horizontal del vector (ℓ), como se observa en la **fig.49**.

Proyección horizontal en los ejes cartesianos = (ℓ_x ; ℓ_y)

Para dar finalmente:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\ell_x}{\ell_y}\right) + Q$$

Q: Factor de corrección por cuadrante según el siguiente cuadro:

Tabla23

Valores para adaptar el resultado respecto a sus valores relativos

Ux	Uy	Q
Componente eje x	Componente eje y	Factor por cuadrante
≥ 0	≥ 0	0
< 0	≥ 0	180
< 0	< 0	180
≥ 0	< 0	360

Nota: se ajusta de acuerdo con el cuadrante, dado por los signos de los componentes dado por:

Stephen Priest

El cálculo de la inclinación de la recta de intersección (Dip), entre la línea de intersección y el plano horizontal estará dado:

$$\text{Buzamiento o Dip } (\beta) = \arcsen\left(\frac{\ell_z}{\sqrt{\ell_x^2 + \ell_y^2}}\right)$$

En el caso del buzamiento o dip, los valores deberán ser siempre positivos, de tal manera que si se obtuviera valores negativos solo se multiplicara por -1, para que la proyección sea en el hemisferio inferior.

Tabla24
Resumen consolidado de sets, sus orientaciones y densidad lineal.

Sectores	Set	Dip-dir (°)	Dip (°)	λ_c ff/m
Sector 01	Set-01	226	66	17.7
	Set-02	87	70	5.8
	Set-03	106	30	38.6
Sector 02	Set-01	59	59	17.7
	Set-02	172	26	5.3
	Set-01	286	27	23.1
Sector 03	Set-02	48	28	19.8
	Set-03	165	64	8.6

Nota: los valores mostrados corresponden a los sets inicialmente identificados.

Fuente: Elaboración propia

Tabla25
Líneas de muestreo de toma de datos, en campo por sectores y sus orientaciones

Sectores	línea de muestreo	Azimut (°)	Buzamiento (°)
Sector 01	A	254	0
Sector 02	B	271	0
Sector 03	C	12	0

Nota: El buzamiento de la línea de muestreo se mantuvo en todo momento horizontal, para evitar deformación en las lecturas, que obligarían a correcciones posteriores.

Fuente: elaboración propia

Dado el resultado de la prueba de hipótesis (pág. 150, fig. 52), para verificar si los sets hallados guardan similitud o no, en sus medianas, la que concluye que no existe discrepancia

de valores de las medianas de los 8 sets, en los 3 sectores en los que se segmentó el muestreo inicialmente, se abordara el problema ahora, como un solo conjunto por lo mismo, utilizando los valores del conjunto de los 8 sets, identificados inicialmente se procedió a hallar los valores que representen a total.

Estos nuevos valores se obtuvieron ponderando las longitudes muestreadas inicialmente, y el número de fracturas detectadas en cada uno de los sets a largo de cada longitud de muestreo y en cada sector, dando los resultados que a continuación se muestran en la tabla N.º 23

Tabla26
Líneas de muestreo de toma de datos, en campo por sectores y sus orientaciones

Sets por toda área de estudio	Dip (°)	Dip-dir (°)	ff Unidad	λ ff/m
Set 01	38.1	137.8	284	17.7
Set 02	26.5	172.6	212	5.8
Set 03	40.1	157.4	404	4.2

Fuente: elaboración propia.

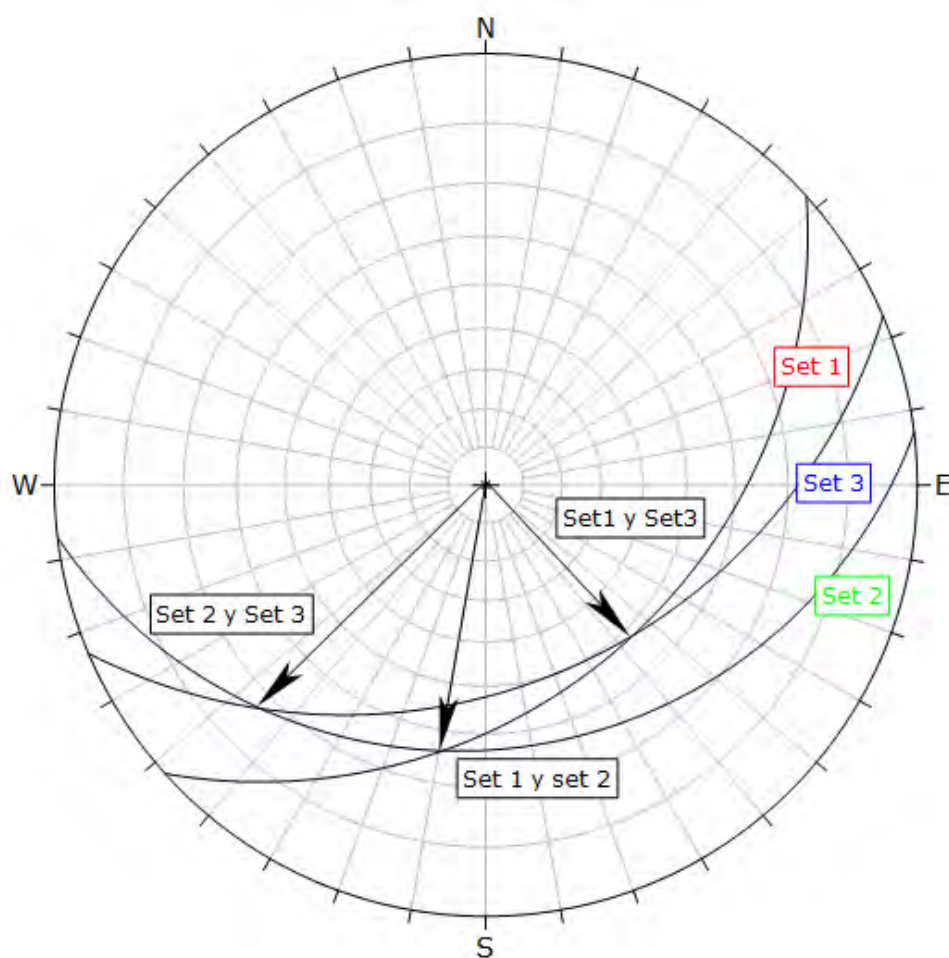
Procediendo con las expresiones de la geometría vectorial y esférica así como tomando los valores del cuadro N.º 23, se procedió a determinar los valores de la intersección de los respectivos sets (1,2 y3), identificados para el área de estudio, los resultados se muestran en el cuadros N.º 24; Posteriormente se utilizara, estos valores para poder determinar los valores mínimos locales o posibles mínimo globales de las fracturas y rqd, en toda el área de estudio, en el macizo rocoso, esto se lograra procediendo a generar intersecciones entre estos tres sets, identificados, para identificar las líneas de intersección, que serán considerados posteriormente como nuevas líneas hipotéticas de muestreo como sugiere (Priest), ya al interior del macizo rocoso, procediendo de acuerdo a los planteado para su obtención con álgebra vectorial, los que proporcionan los resultados para los Buzamiento y Azimut, se muestran en el cuadro tabla N° 24.

Tabla27
Intersección de sets, y orientación de las líneas de sus intersecciones

Intersección entre sets		α (°)	β (°)
Set 01	Set 02	189.2	26
	Set 03	135.5	38
Set 02	Set 03	225.1	17

Fuente: Elaboración propia.

Figura58
Orientación de intersección entre planos



Nota: Grafica polar para ilustrar las intersecciones ente los sets 1,2 y 3 que representan las fracturas del macizo rocoso en evaluación.

Fuente: Elaboración propia.

La información que ya se tiene se deberá complementar hallando las fracturas en las orientaciones de las líneas de intersección halladas para el conjunto, por lo que es necesario hallar el ángulo agudo (δ), entre las líneas de intersección (nuevas líneas de muestreo relativas), y los sets que participan en cada uno, la frecuencia de fracturas a lo largo de cualquier línea en la que se conozca su orientación (α_s y β_s), será dada por el aporte de cada set de fracturas como proyección a la línea en evaluación, esto se logra hallando el ángulo δ (agudo), entre la recta de muestreo y las normales a los sets de fracturas que se está considerando por sus vectores unitarios por (n_x ; n_y y n_z)

Siendo la recta de muestreo representada por un vector unitario con componentes en los ejes cartesianos como:

$$S_x = \cos \alpha_s \cdot \cos \beta_s$$

$$S_y = \sin \alpha_s \cdot \cos \beta_s$$

$$S_z = \sin \beta_s$$

Y los componentes de las fracturas dadas por:

$$n_x = \cos \alpha_n \cdot \cos \beta_n$$

$$n_y = \sin \alpha_n \cdot \cos \beta_n$$

$$n_z = \sin \beta_n$$

Por tanto, en ángulo δ se podrá hallar por el producto de

$$\cos \delta_i = S \cdot n_i$$

Y desarrollando será:

$$\cos \delta_i = S_x n_x + S_y n_y + S_z n_z$$

Aplicando esta expresión se halla cada uno de los valores del ángulo δ_i , para cada línea y set analizados, los mismos que se muestran en la tabla 24.

Tabla 28

Ángulos de intersección (δ_i), entre las líneas de muestreo y los Sets.

Intersección de set	α (°)	β (°)	δ (°)
línea 1 y Set 1	189.2	26	89.9
línea 1 y Set 2	189.2	26	89.9
línea 1 y Set 3	189.2	26	81.2
línea 2 y Set 1	135.5	38	89.9
línea 2 y Set 2	135.5	38	74.6
línea 2 y Set 3	135.5	38	89.9
línea 3 y Set 1	225.1	17	78.4
línea 3 y Set 2	225.1	17	89.6
línea 3 y Set 3	225.1	17	89.7

Fuente: Elaboración propia.

Y, la frecuencia total para cada línea consideradas estará dada por la expresión desarrollada por Harrison y Hudson.

$$\Lambda_s = \sum \lambda_i * |\cos \delta_i * S_i|$$

Que desarrollada seria:

$$\Lambda_s = \lambda_1 |\cos \delta * S_1| + \lambda_2 |\cos \delta * S_2| + \lambda_3 |\cos \delta * S_3| + \dots$$

Λ_s = frecuencias totales en una línea de muestreo.

Es decir que la frecuencia total de fracturas en la recta considerada será la sumatoria de los aportes parciales de las fracturas de los sets de fracturas que atraviesa la línea y el ángulo que esta forma con los diferentes sets.

La información que ya se tiene se deberá complementar hallando las fracturas en las orientaciones de las líneas de intersección halladas para el conjunto, por lo que es necesario hallar el ángulo agudo (δ), entre las líneas de intersección (nuevas líneas de muestreo relativas), y los sets que participan en cada uno

Aplicando esta expresión tenemos los resultados en tabla N°.25

Tabla 29

Frecuencia de fracturas en las líneas de intersección y los Sets)

Intersección de set	δi	λi	$\text{Cos } \delta i^* (\lambda i)$
	(°)	ff/m	ff/m
línea 1 y Set 1	89.9	17.7	0.03
línea 1 y Set 2	89.9	5.8	0.01
línea 1 y Set 3	81.2	4.2	0.64
Frecuencia fracturas en la línea muestreo 01			0.68
línea 2 y Set 1	89.9	17.7	0.03
línea 2 y Set 2	74.6	5.8	1.54
línea 2 y Set 3	89.9	4.2	0.00
Frecuencia fracturas en la línea muestreo 02			1.57
línea 3 y Set 1	78.4	17.7	3.55
línea 3 y Set 2	89.6	5.8	0.04
línea 3 y Set 3	89.7	4.2	0.02
Frecuencia fracturas en la línea muestreo 03			3.62

Fuente: Elaboración propia.

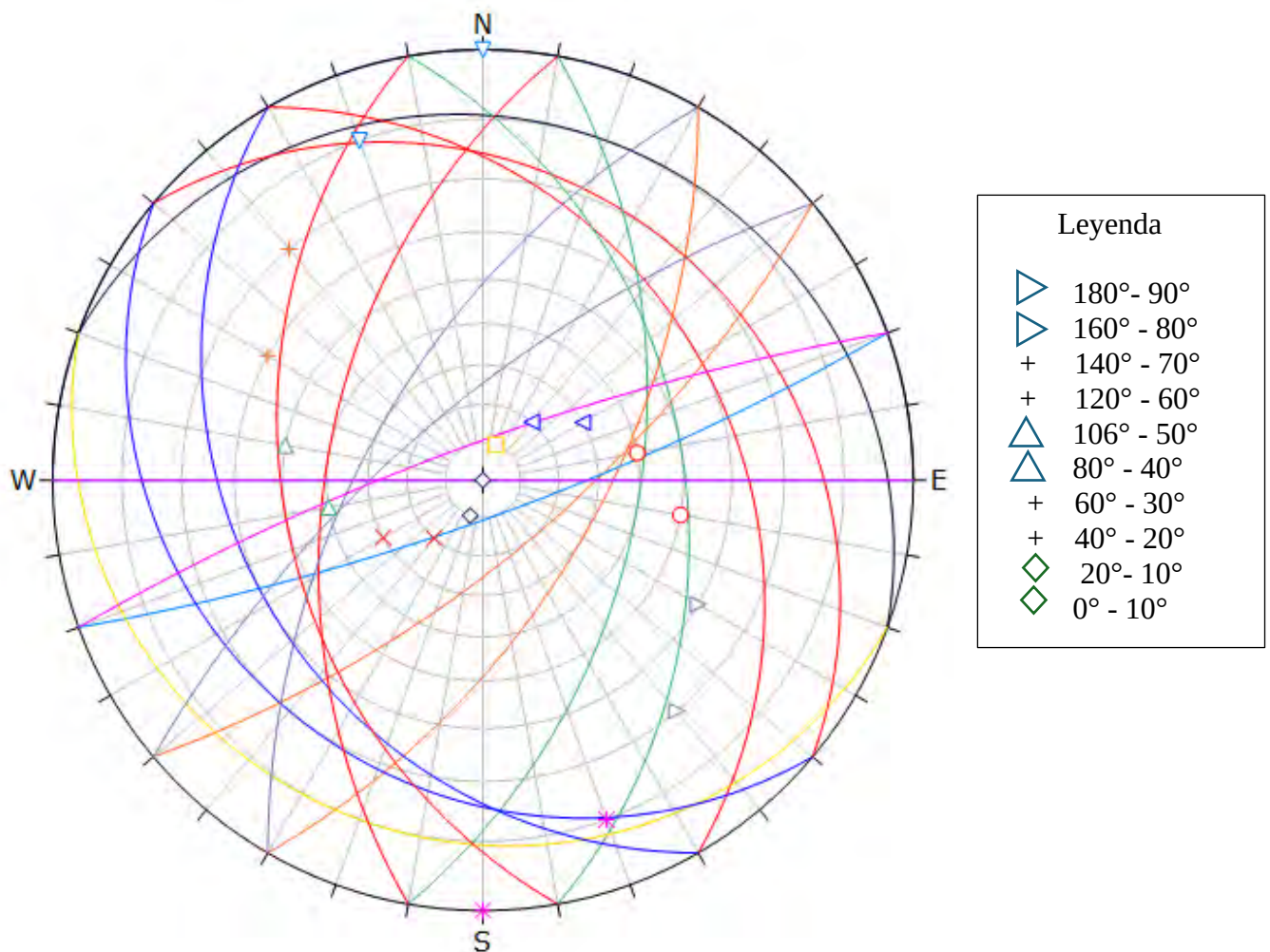
Los valores hallados son coherentes ya que los valores mínimos se presentaran en la intersección de sets, (caso de set 1 y set 2 y set 1 y set 3), siendo puntos singulares por coincidir en muchos casos con la línea paralela o pseudo paralela a los set y por su puesto la probabilidad de intersección es mínima y cero, al realzar este procedimiento se identifica los mínimos que pueden ser locales, es decir mínimo para la intersección particular o mínimo global si luego de graficar la frecuencias de la fracturas en todas las direcciones posibles es la menor, la frecuencia máximas entonces se pueden hallar por una generalización de la expresión anteriormente citada pero a lo largo de 360° grados de orientación y 90° grados buzamiento estas, son nuevamente

líneas hipotéticas de muestreo que nos dará una imagen de la distribución de frecuencias en todo el macizo rocoso en evaluación.

Estas líneas de muestreo son mostradas en la siguiente figura N.º 51, como se observa replica los planos por simetría a lo largo de los azimuts, esto producirá también, se verá más adelante una duplicidad de gráficos en los valores de frecuencias de fracturas, los valores del RQD y las calificaciones del macizo rocoso, de acuerdo con la tabla 01.

Figura 59

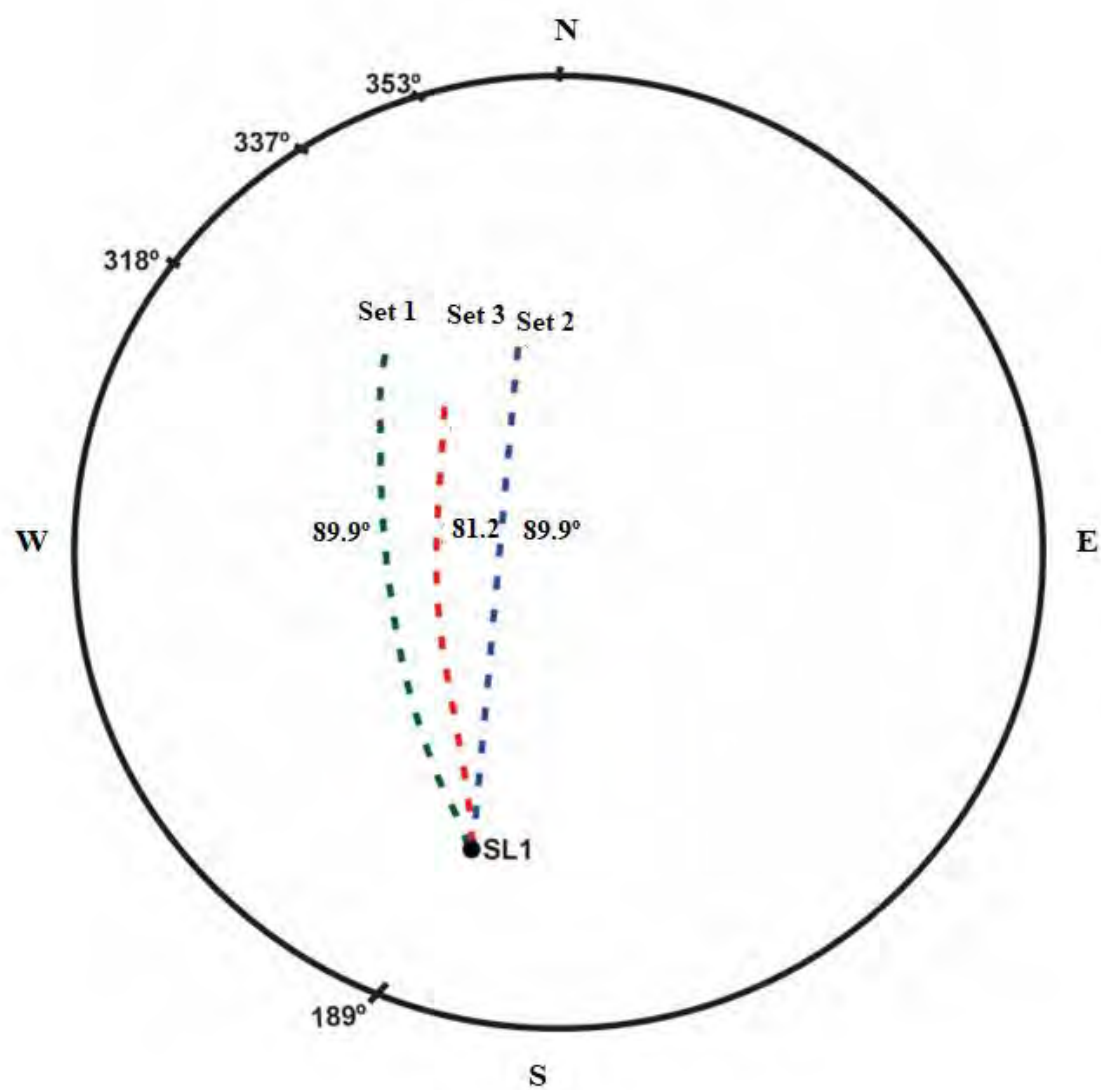
Líneas de azimut y buzamiento para el sector en estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 60

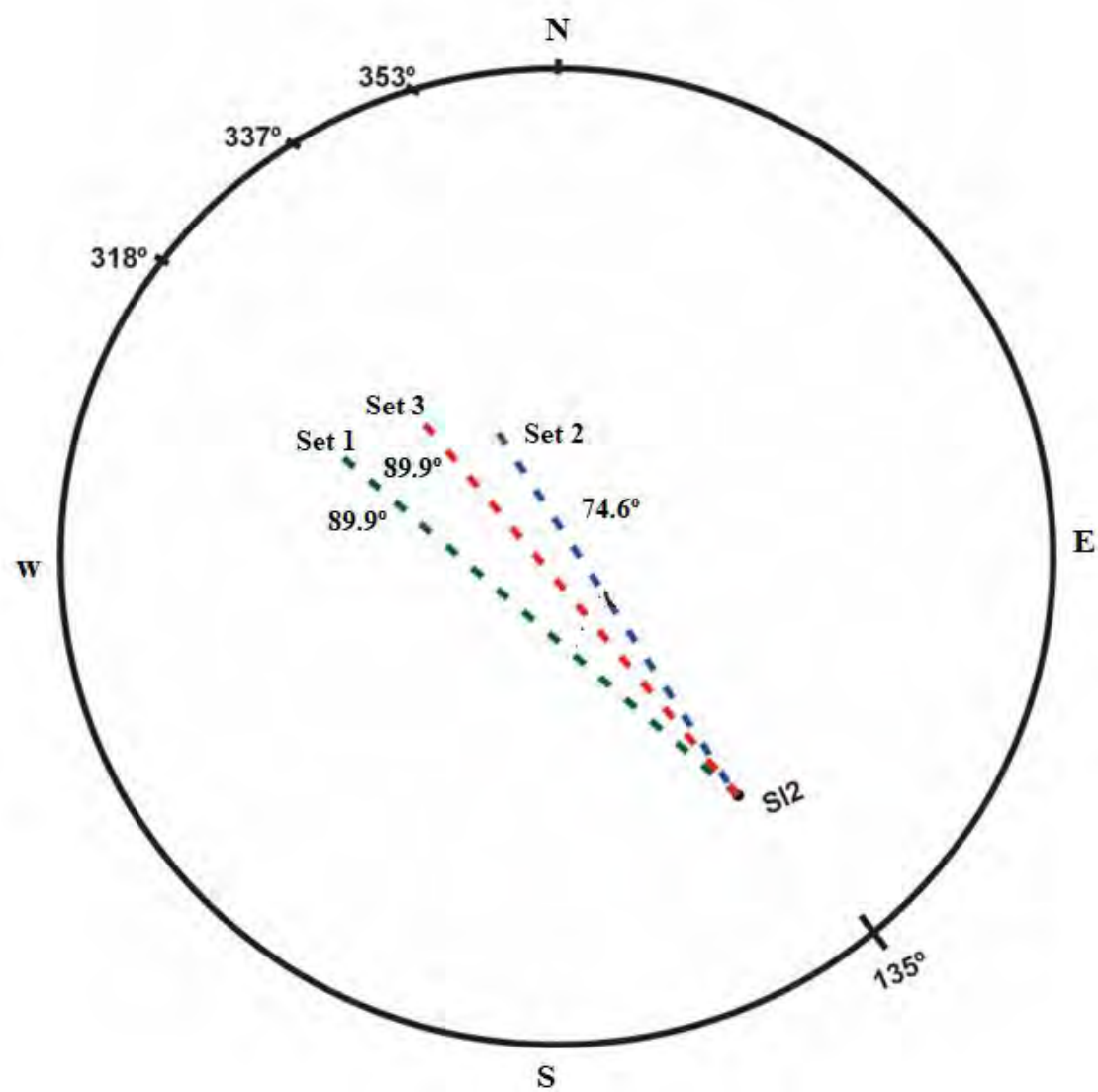
Representación de los ángulos δi entre los sets y la línea de muestreo 01



Fuente: Elaboración Propia

Figura 61

Representación de los ángulos δ_i entre los sets y la línea de muestreo 02



Fuente: Elaboración propia

Figura 62

Representación de los ángulos δ_i entre los sets y la línea de muestreo 03

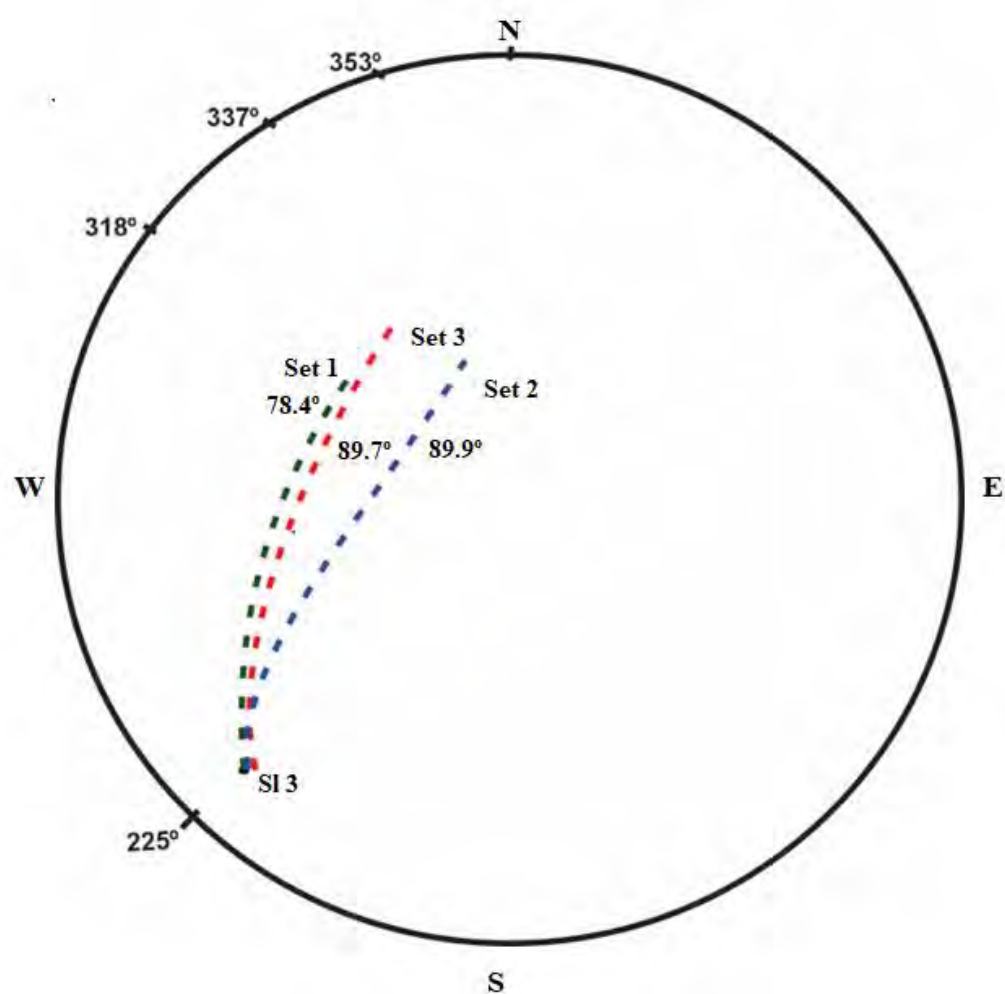
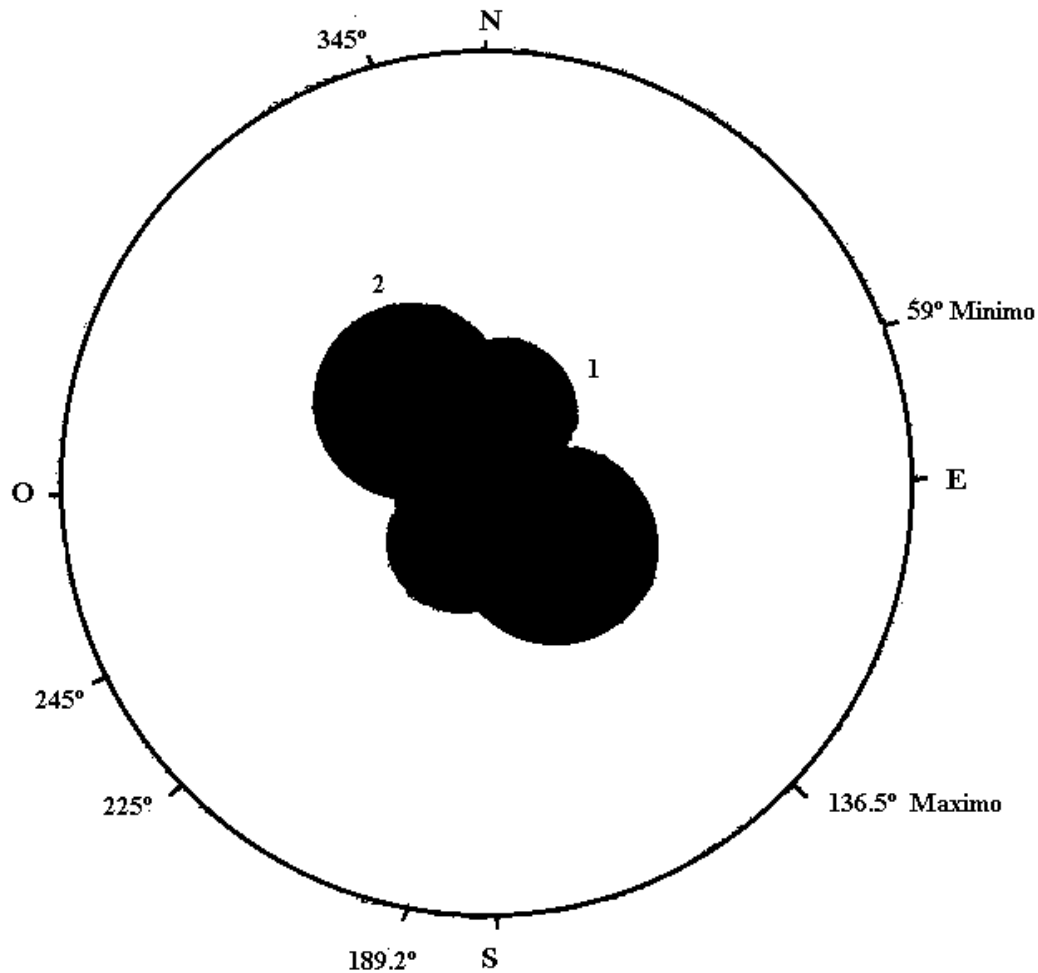


Figura 63

Distribución espacial de la intersección de los tres sets de fracturas



Nota: Grafico desarrollado con la información hallada de la intersección y frecuencia de fracturas para los tres sets considerados.

Fuente: Elaboración propia

Como consecuencia de la interacción entre los tres principales set de fracturas, se observa en la Fig.54 principalmente dos lóbulos dominantes, siendo encapsulada por completo y por superposición el set 3, observándose que el menor numero de fracturas se da en la intersección de los sets 01 y 02, con un ángulo de 50° , así como el valor de la frecuencia máxima a los 136.5° , se debe considerar que el valor mínimo encontrado de la intersección directa de

los tres set, es una aproximación que en condicional pudiese o no ser el mínimo global, lo cual deberá verificarse posteriormente, al igual que el máximo hallado, pudiese ser un máximo local o global, de todas maneras la evaluación más general y no puntual caso de solo tres direcciones deberá ser considerado, por otra parte, está claro que la distribución de fracturas es una función discontinua en el espacio, que además varia con la orientación de la evaluación.

Como ya se mencionó, la evaluación de la distribución espacial de la fracturas en todo el área de estudio, además de las tres intersecciones ya halladas tendrán que generalizarse a todo el área de estudio, en realidad a todas las direcciones posibles, los cual se conseguirá desarrollando múltiples direcciones hipotéticas de muestreo haciendo rotar el valor de Azimut de 0° a 360° , y el buzamiento de 0° a 90° , estas nuevas líneas de muestreo que abarcan todo las posibilidades de orientación de las líneas de muestreo, en intersección con los tres sets que se están considerando nos deberán dar una idea más clara de la distribución de las redes de fracturas en el macizo rocoso en evaluación. Procediendo de manera similar al proceso ya considerado para las tres direcciones de intersección se procedió a realizar la evaluación del nuevo conjunto dando los siguientes resultados mostrados a continuación en la tabla N° 29.

Tabla 30:

Líneas de muestreo equidistantes para toda el área de estudio

Líneas de muestreo	α_s (°)	β_s (°)
Línea 01	0	0
Línea 02	20	10
Línea 03	40	20
Línea 04	60	30
Línea 05	80	40
Línea 06	100	50
Línea 07	120	60
Línea 08	140	70
Línea 09	160	80
Línea 10	180	90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31

Líneas de muestreo equidistantes para toda el área de estudio

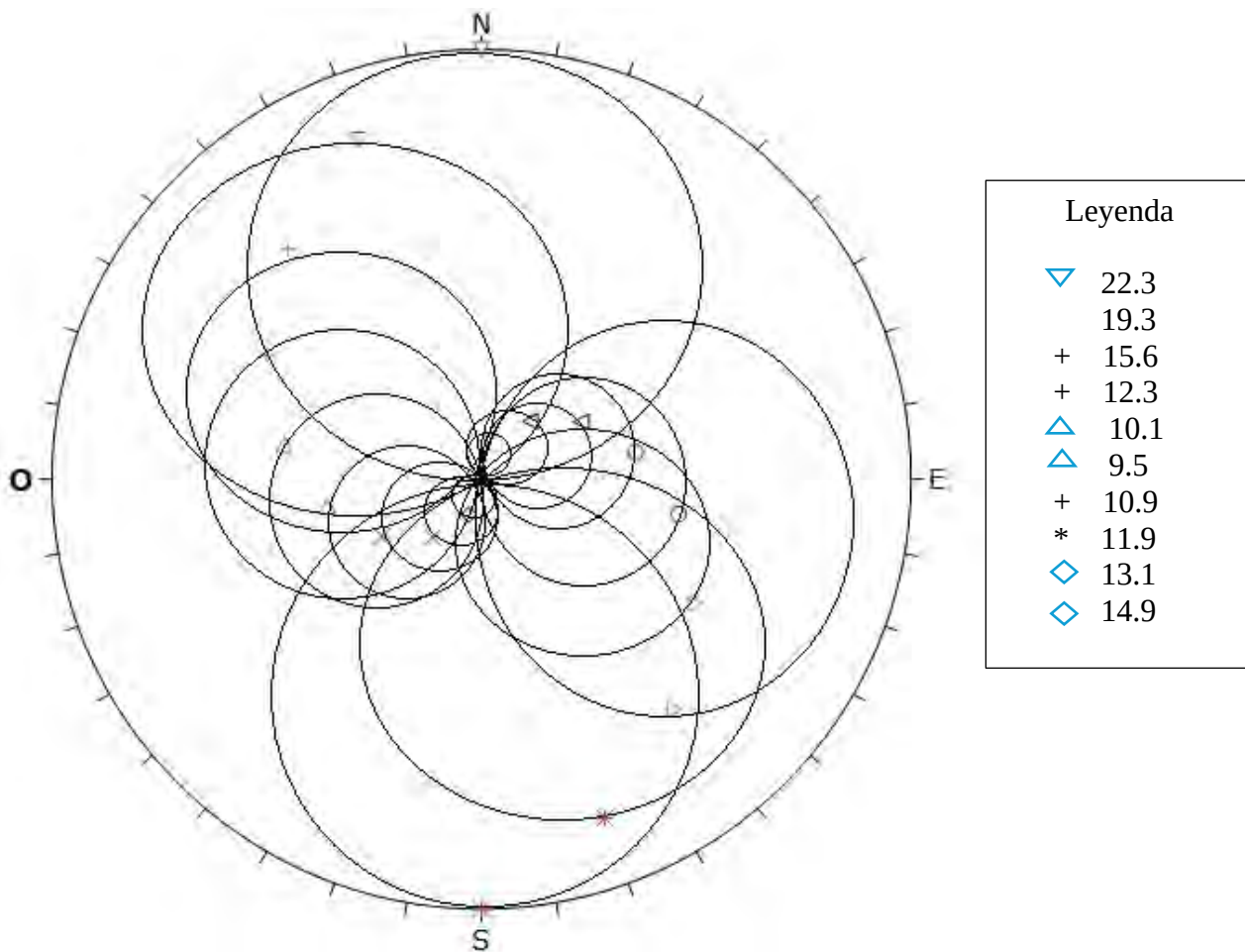
Líneas	ff/m	$\%RQD_{\lambda_i} = 100e^{-0.1\lambda_i}(0.1\lambda_i + 1)$	Tipo	Valoración
01	14.91	56.08	III	Medio
02	13.17	62.08	III	Medio
03	11.90	66.61	III	Medio
04	10.38	72.18	III	Medio
05	10.15	73.03	III	Medio
06	12.29	65.22	III	Medio
07	15.62	53.72	III	Medio
08	19.33	42.46	II	Mala
09	22.33	34.65	II	Mala

Fuente: Elaboración propia.

Graficando estos valores en una plantilla de Schmidt equiareal, para poder visualizar el desarrollo y la distribución de los valores de las fracturas en toda el área de estudio, esta grafica nos dará una visión más amplia de los mínimos valores y máximos y sus orientaciones, como se observa en el grafico N.º 55.

Figura 64

Red de distribución espacial de fracturas como componentes de los tres sets de fracturas

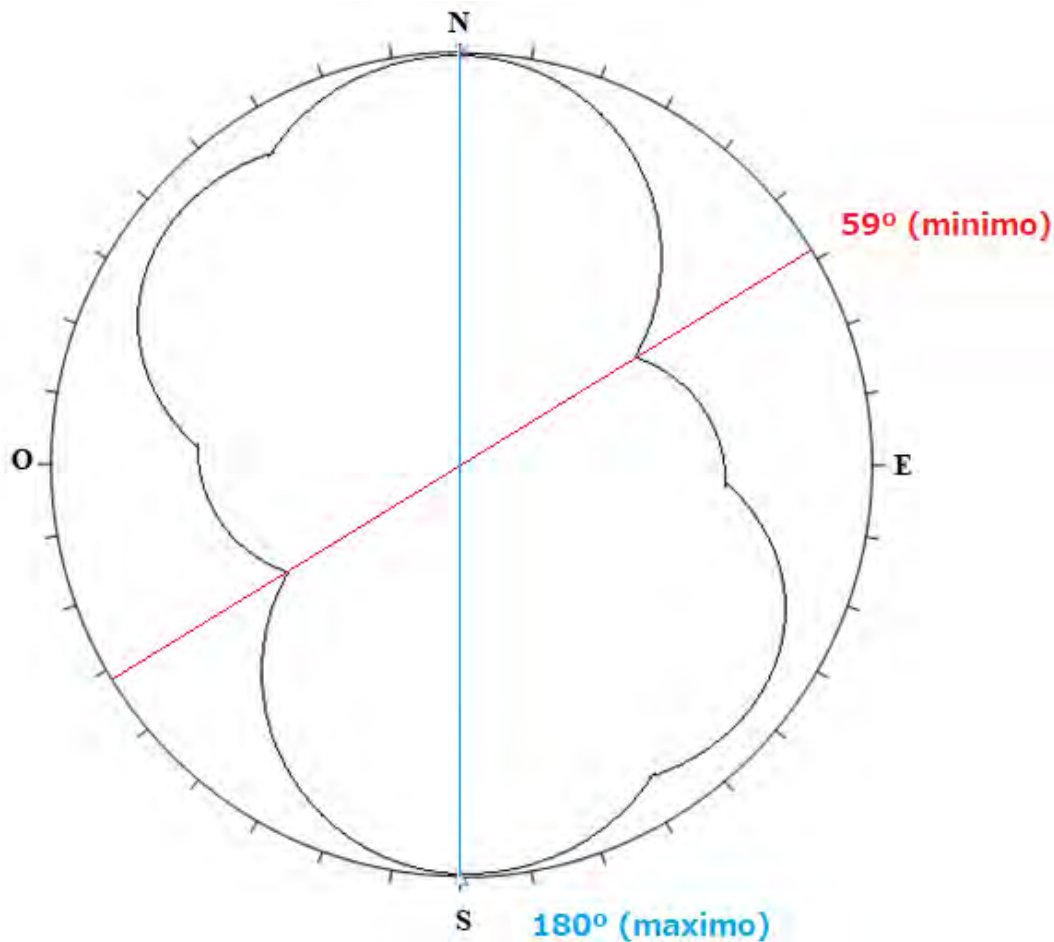


Fuente: Elaboración propia.

Se observa, como muchas fracturas son encapsuladas o sobre puestas, esto podría interpretarse como las fracturas tienen capacidad aditiva. En particular se observa dos tres sets dominantes que son los que se podrán considerar.

Figura 65

Sectorización de distribución espacial de fracturas como componentes de los tres sets



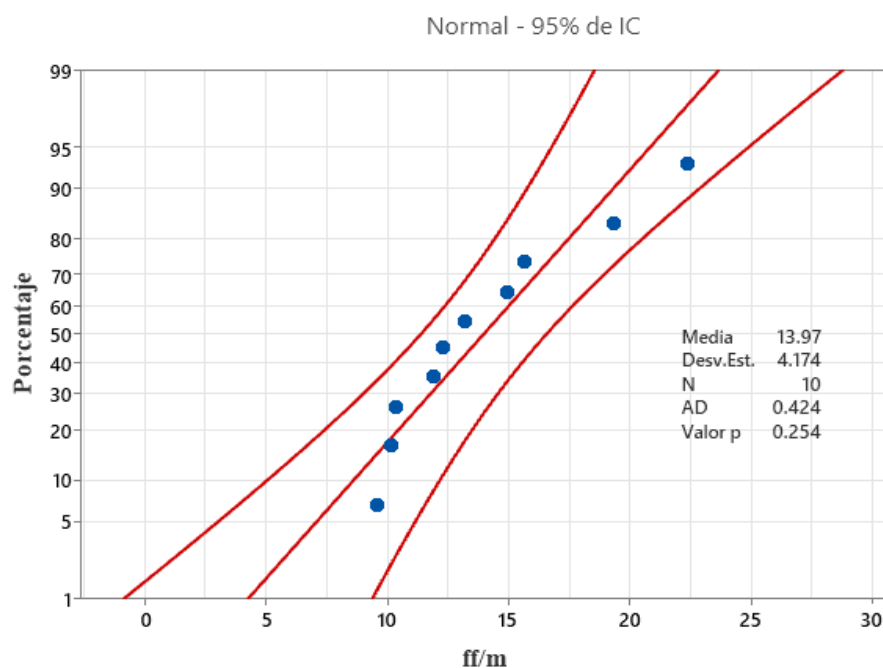
Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica N.º 56, se observa claramente que de las 10 líneas de muestreo, son únicamente dominantes tres, qué por su mayor frecuencia de fracturas encapsula o se superpone a los otros sistemas de fracturas, tener en cuenta que cada uno de los componentes de los tres sets analizados (1, 2 y 3), aportan en cada una de las 10 direcciones de tal manera que lo que estamos visualizando son resultantes de aportes de fracturas en las diferentes orientaciones según como ya se explicó el ángulo agudo δ_i . Se observa que la mínima frecuencia de fracturas se de acuerdo con la teoría en forma de “valles en V”, y son la consecuencia del alineamiento de los sets con la línea de muestreo es decir en muchos casos paralelos o con ángulos muy pequeños, de tal manera que los aportes se reducen.

La evaluación de la correlación entre las ff/m & RQD%; se procederá a realizar la prueba de correlación entre estas dos variables para los cual debemos probar los supuestos como la Normalidad de los valores de ff/m y RQD% se obtuvieron los siguientes resultados de observan en las figuras N.º 57 y 58

Figura 66

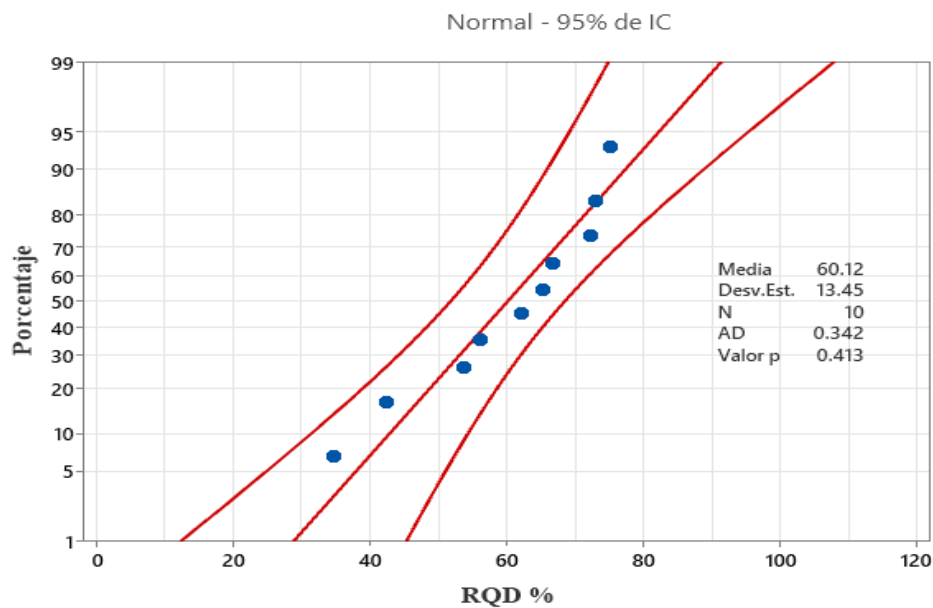
Grafica de verificación de ajuste a FDP, normal de los valores de ff/m



Fuente: Elaboración propia

Figura 67

Grafica de verificación de ajuste a FDP, normal de los valores de RQD %

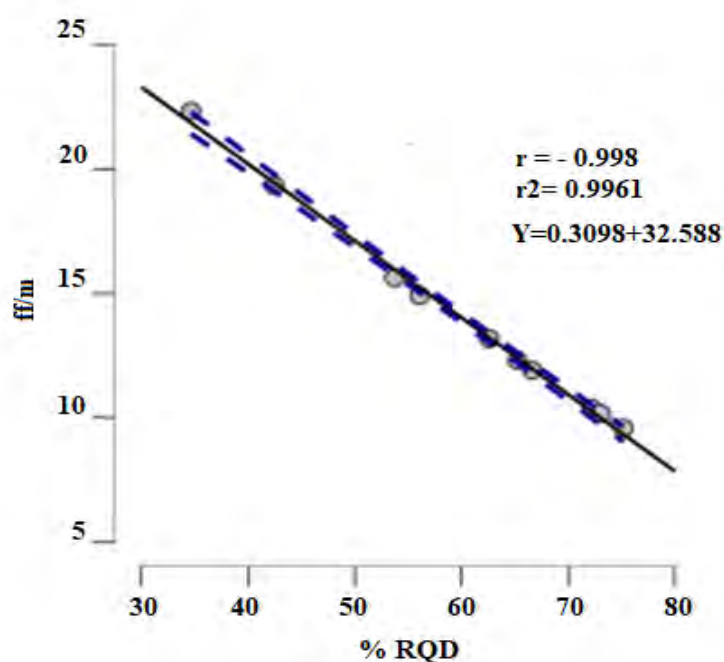


Fuente: Elaboración propia

En los gráficos 57 y 58 se observa que los valores evaluados en ambos casos no salen de la banda de confiabilidad del 95%, así mismos para ambos gráficos el valor de $P > 0.05$, siendo 0.05 el valor de significancia, por tal razón se concluye que tanto para la ff/m así como RQD%, los valores siguen un FDP, normal y entonces podemos evaluar su coeficiente de correlación de Pearson.

Figura 68

Correlación entre ff/m & RQD para toda el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ajuste se muestran a continuación en la tabla N°.27

Tabla 30

Resumen de ajuste para ff/m & %RQD, del área del estudio

Variable		ff/m	%RQD
1. ff/m	R de Pearson	-	
	Valor p	-	
2. %RQD	R de Pearson	-0.998	-
	Valor p	2.438×10^{-11}	-

Nota: Todos los contrastes una cola, para correlación negativa.

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$, de una cola.

Con el propósito de evaluar la significancia estadística del coeficiente de correlación ($r = -0.998$), dado que el coeficiente de Pearson mide la fuerza y dirección de una correlación lineal, entre dos variables, mas no indica si esta relación es estadísticamente significativa, el (t-test), asociado apoya en su identificación.

Hipótesis:

H_0 = La correlación poblacional es cero ($\sigma = 0$)

H_1 = La correlación poblacional no es cero ($\sigma \neq 0$)

Es decir, la correlación hallada es muestral ($r = -0.998$), y lo que se desea es hacer la inferencia estadística y hacer extensivo el conocimiento focalizado a la población, generalizando el resultado al macizo rocoso en evaluación en su conjunto a través de la validación del coeficiente hallado, el estadístico será calculo por:

$$t = \frac{r * \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}}$$

Donde:

t: Valor crítico.

n: Tamaño de la muestra (10)

r: Coeficiente de Pearson hallado.

Reemplazando valores, para una prueba a dos colas se tendrá para la prueba de significancia.

$$t = \frac{-0.998 * \sqrt{10 - 2}}{\sqrt{1 - (0.998)^2}}$$

$$t = 44.65$$

Comparando con el valor critico en la tabla t (student) para un nivel de significancia ($\alpha = 0.05$ (bilateral), y gl = (10-2), hallando que el valor critico según la tabla mencionada se tiene: $t = 2.306$ el criterio de decisión será entonces, si el valor de $|t| > 2.306$; se rechaza H_0 por tanto por dado que t es 44.65 es > 2.306 , se rechaza la H_0 y se concluye que la correlación lineal hallada es altamente significativa y es válida no solo para las muestra puntuales que se tomaron a través de las 10 líneas de muestreo, sino que además tendrá definitivamente valor para la población de fracturas del macizo rocoso del talud carretero del tramo km12 de Cusco-Paruro, que es motivo de estudio, así mismo el coeficiente de determinación $r^2 = 0.996$; se

explica como un agente predictor dado que significaría que el 99.6% de la variabilidad del RQD, podrá ser explicado a través de las fracturas del área.

Por tanto, se puede afirmar que la correlación entre las fracturas del área de estudio y los valores de los % RQD, serán:

Altamente significativa para toda el área verificada con el (t-test).

La correlación debe ser considerada como íntima dada el valor de $(r = - 0.998$, muy próximo a 1.0)

La correlación es negativa, es decir inversa; lo cual guarda coherencia con el concepto de a mayor número de fracturas menor será el % de RQD.

Prueba de anova de una variable.

En el área de estudio se identificaron dos grupos de % RQD (Cuadro 26), con el propósito de comparar las medias de las frecuencias de fracturas (ff/m), entre los grupos y la calificación de RQD (II y III), se procedió a:

Prueba de hipótesis

Las características que presentan las tres familias principales del macizo rocoso que fueron agrupadas en dos calificaciones principales, serán procesados los datos mediante los softwares SPSS v25 y JASP, para confirmar o desestimar la hipótesis del macizo rocoso en la zona de San Jerónimo – Paruro km.12; se puede establecer lo siguiente:

Planteamiento de hipótesis.

H₀: No hay diferencia en la ff/m entre los grupos II y III. que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12.

H₁: Existe diferencia significativa entre las frecuencias de discontinuidades que presenta la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12.

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Nivel de confiabilidad: $1-\alpha = 95\%$

Verificación de supuestos.

Tabla 31

Verificaciones de Supuestos

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	p
0.079	1.000	8.000	0.786

Fuente: Elaboración propia

Dado que el valor $p > 0.05$, se puede concluir que las varianzas cumplen con la Homocedasticidad.

La normalidad para los grupos II $p = 0.574$ (pequeño, pero se asume normalidad), para grupo III $p = 0.312$ (distribución normal)

Tabla
Parámetros descriptivos

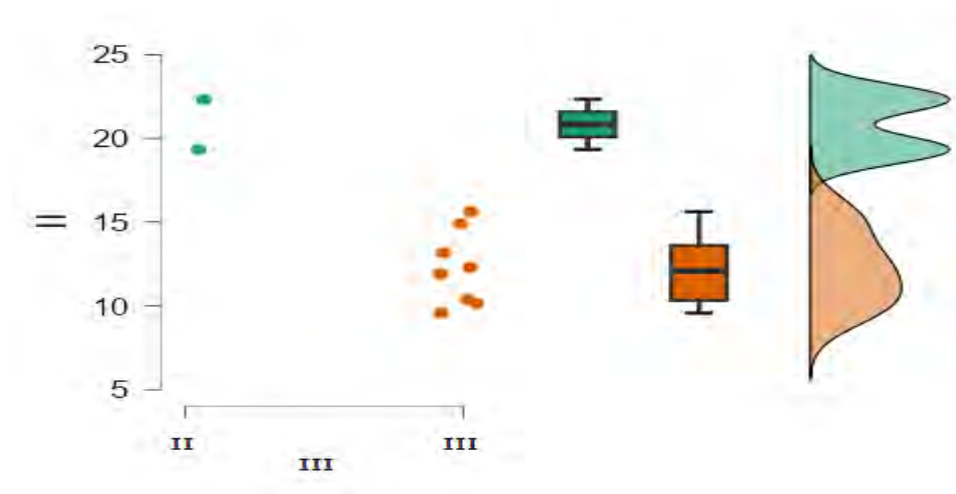
32

Fuente: Elaboración propia

Casos	N	DT	ET	Coefficiente de variación
II	2	2.121	1.500	0.102
III	8	2.220	0.785	0.181

Figura 69

Mapa integral de los valores para los II y grupo III



Nota: De izquierda a derecha, se observa un gráfico de dispersión en el extremo izquierdo, seguido de la variación local (cajas), para los dos grupos, además la distribución de valores.

Fuente: Elaboración propia

Tabla

33

Anova frecuencia de fracturas y % RQD

Fuente: Elaboración propia

Casos	Suma de cuadrados	gt	Cuadrado Medio	F	p	η^2
III	117.821	1	117.821	24.173	0.001	0.751
Residuales	38.992	8	4.874			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III
Resultados clave.

Estadístico F: 24.173

P-valor 0.001 ($p < 0.01$).

$\eta^2 = 0.751$

Tabla 34
Contraste post-hoc de tukey

Comparaciones Post-hoc - III

		IC del 95% para la Diferencia de Medias					
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p _{Tukey}
II	III	8.581	4.556	12.606	1.745	4.917	0.001**

** p < .01

Fuente: Elaboración propia.

Interpretación:

El ensayo de ANOVA, revelo diferencias estadísticamente significativas en la frecuencia de fracturas entre los grupos II y III.

Grupo II (RQD 25 – 50%) λ alta (media = 20.83)

Grupo III (RQD 51 – 75%) λ baja (media = 12.25)

Resultado: F = 24.15, p = 0.001 Diferencia significativa.

Así como una fuerza de efecto grande ($\eta^2 = 0.75$), Esto confirmaría que la calidad de la roca (RQD), esta fuertemente asociada a la densidad de fracturas. Y por esto se rechaza la H_0 , es decir al verificar que las discrepancias entre los grupos II y III, son tan pronunciados, y al observar cómo estos cambios están condicionados a la ff/m, al nivel de influenciar en la calidad de calificación de la roca de mala a buena.

Para ilustra más la conclusión se tiene:

Tabla 35

Cuadro comparativo p valor, niveles de significancia, niveles de confianza y riesgo

Valor p	Nivel α	Nivel de confianza	Riesgo tipo I	Interpretación (ff & RQD)
P<0.01	0.01	99%	1%	Evidencia muy fuerte contra H_0
P<0.001	0.001	99.9%	0.1%	Evidencia extremadamente fuerte contra H_0
P<0.05	0.05	95%	5%	Evidencia Suficiente contra H_0

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso evaluado con $\alpha = 0.05$ y dado que el valor de anova da un resultado de 0.001; entonces queda claro que por ser $0.001 < 0.05$ (nivel de confianza del 95%); se rechaza la H_0 y si $\alpha = 0.01$ También se rechaza la H_0 , pues $0.001 < 0.01$ (confianza del 99%).

Como conclusión el valor de $p < 0.01$ es significativo tanto al 95 % que ya es elevado, así como al 99% de confianza; por otra parte, para $p < 0.001$ esto equivaldría a un riesgo de 0.1% de probabilidad de cometer un error de tipo I, es decir de rechazar H_0 siendo positivo o lo que se conoce como falsos positivos dando:

Riesgo de error tipo I: 0.1% (muy bajo)

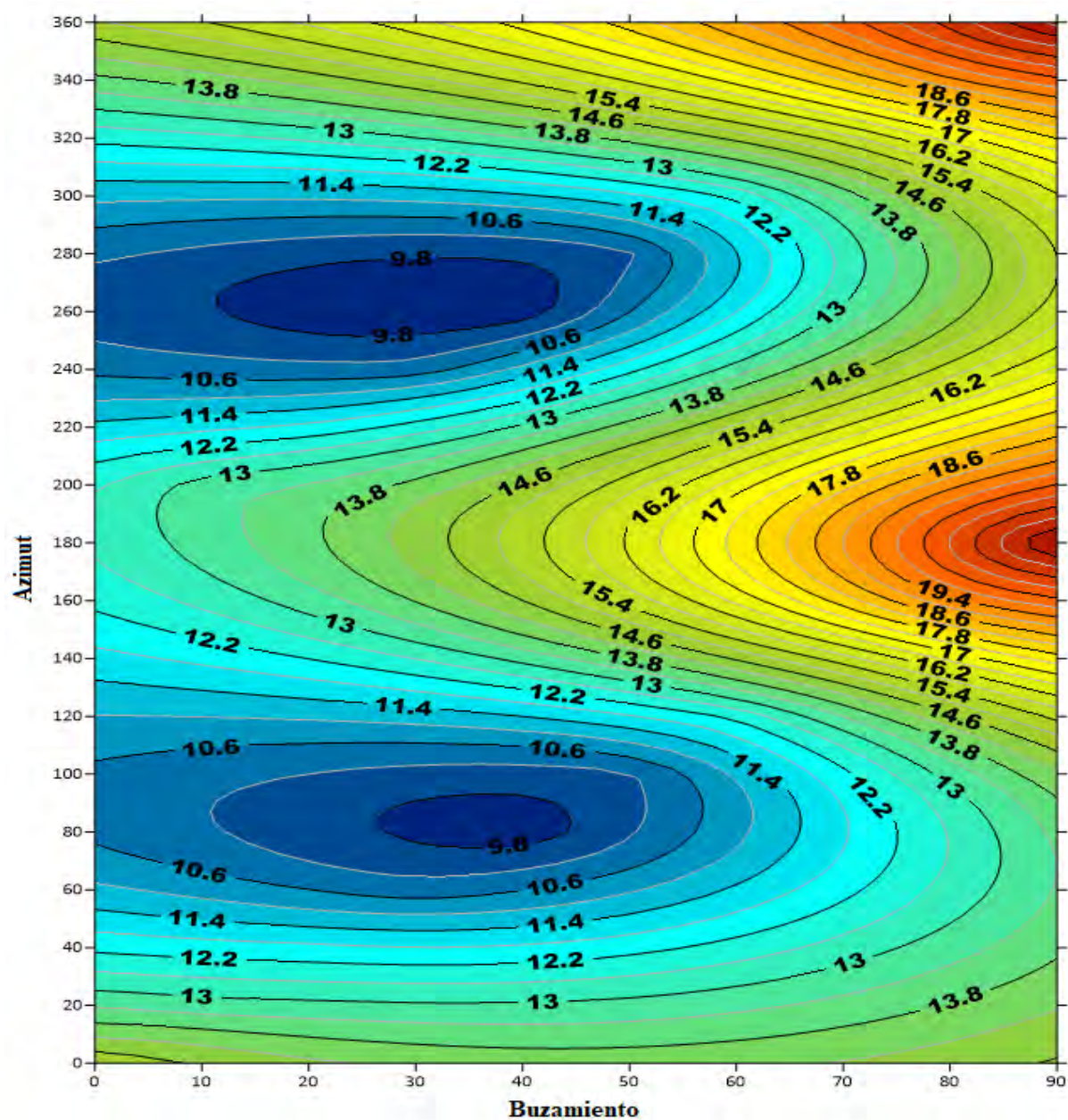
Nivel de confianza: 99.99% (Muy alto)

Por tanto, se concluye que existe evidencia sólida que la ff influyen en el RQD, incluso con un criterio ultraconservador ($\alpha = 0.001$).

En la figura N.º 63 se aprecia la distribución de frecuencias como resultado gráfico de los muestreos desarrollados los largo de 360° de azimut y 90° de buzamiento

Figura 70

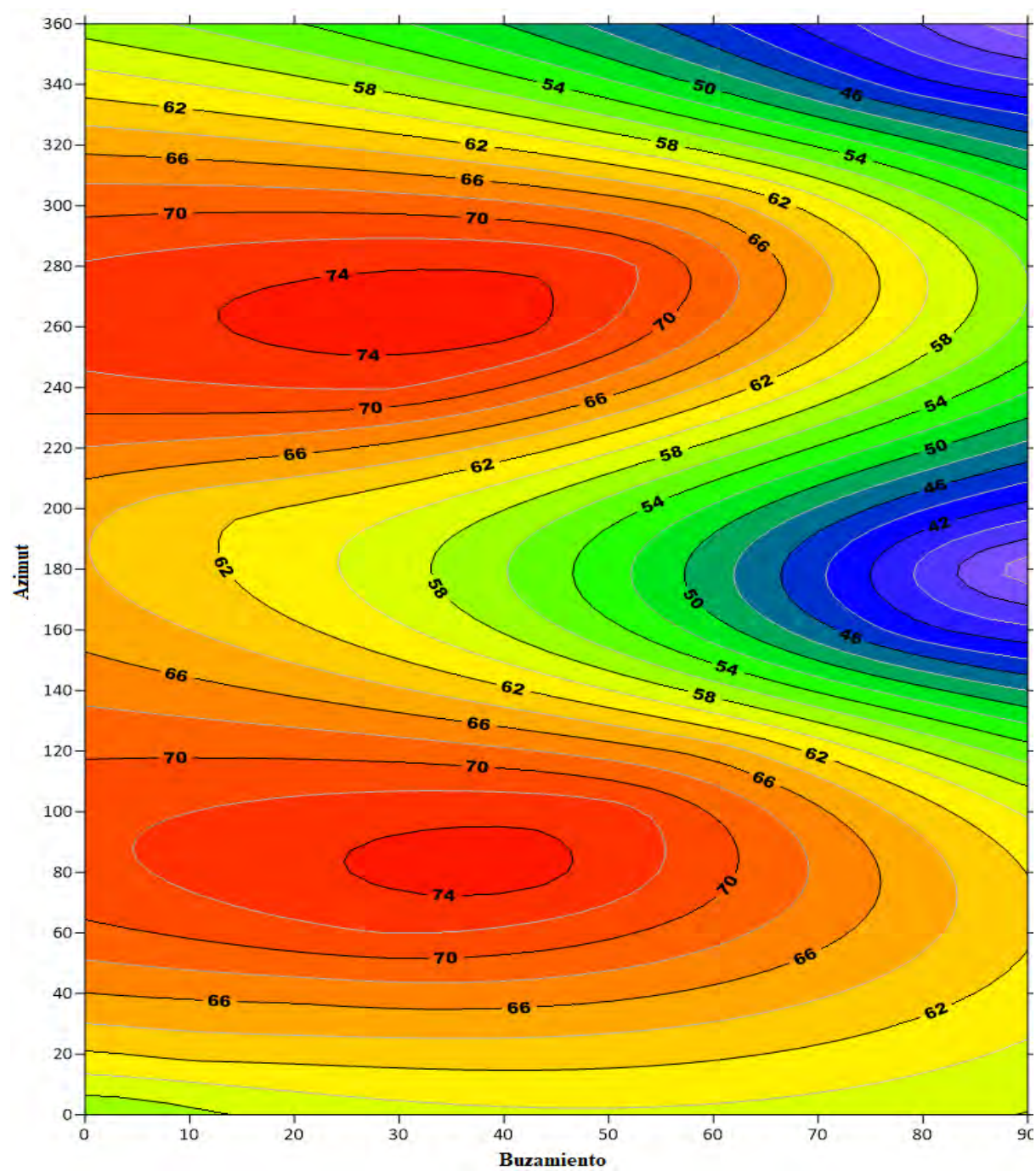
Mapa integral de los valores para las densidades de fracturas en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 71

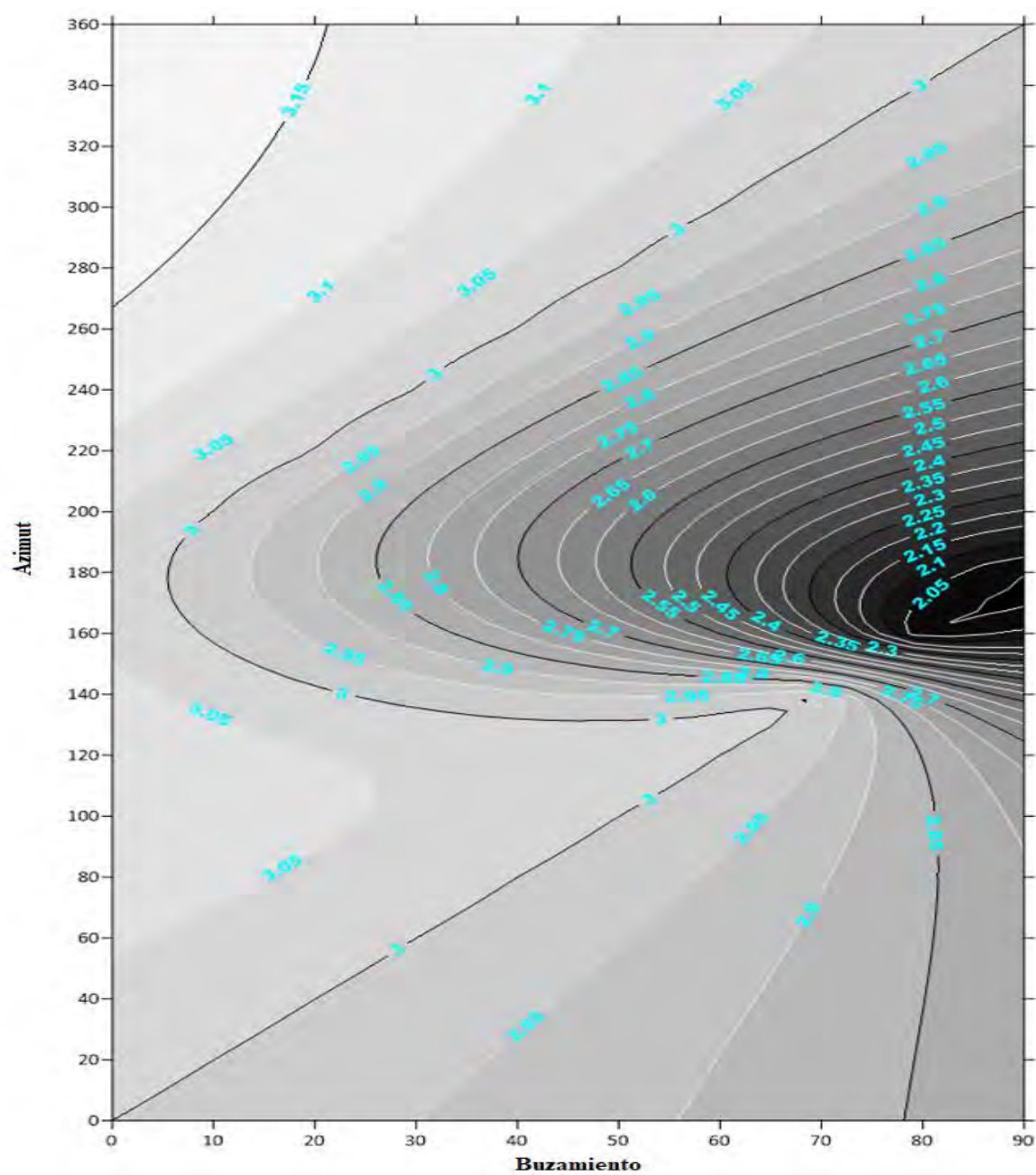
Mapa integral de los valores para la % RQD en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 72

Mapa integral de los valores para la calidad de macizo rocos en el área de estudio



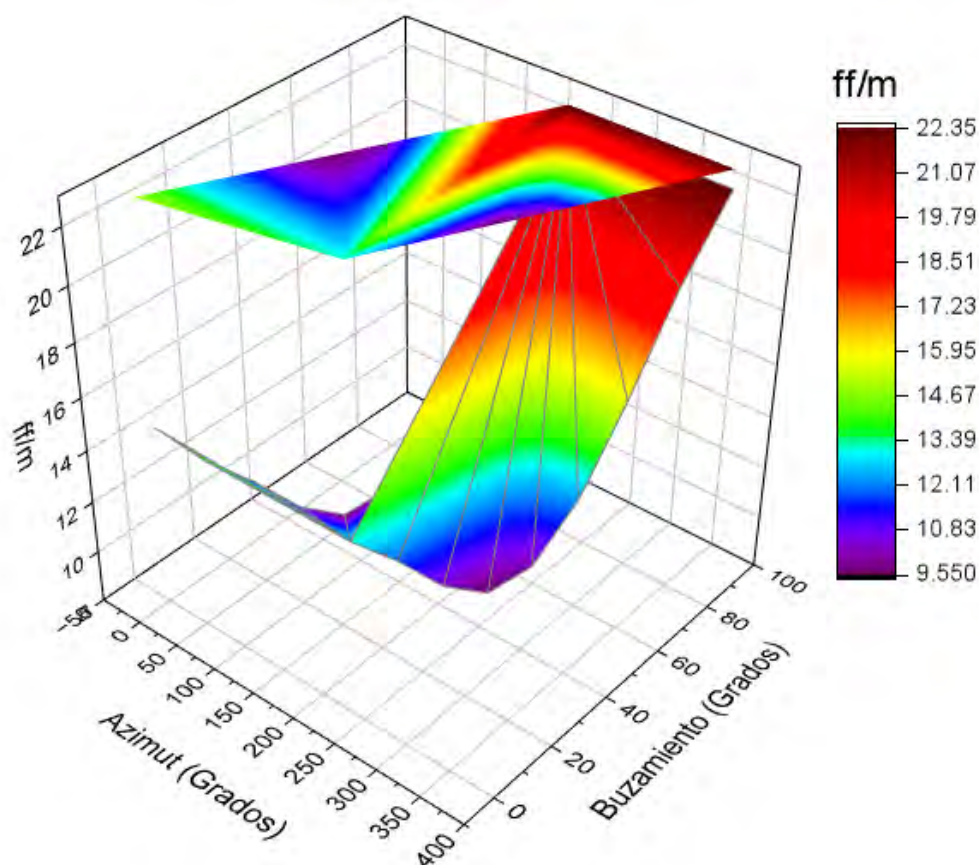
Fuente: Elaboración propia

Nota: La clasificación de acuerdo con el cuadro N.º 01. que valora los RQD en II Roca buena y III, roca muy buena.

En la Figura 64 se presentan los valores de % RQD para todo el talud en estudio, y en la Figura 65 la valoración de acuerdo con la tabla 01 en escala de II, III, se representaron con valores de 1 y 3 respectivamente para su representación gráfica.

Figura 73

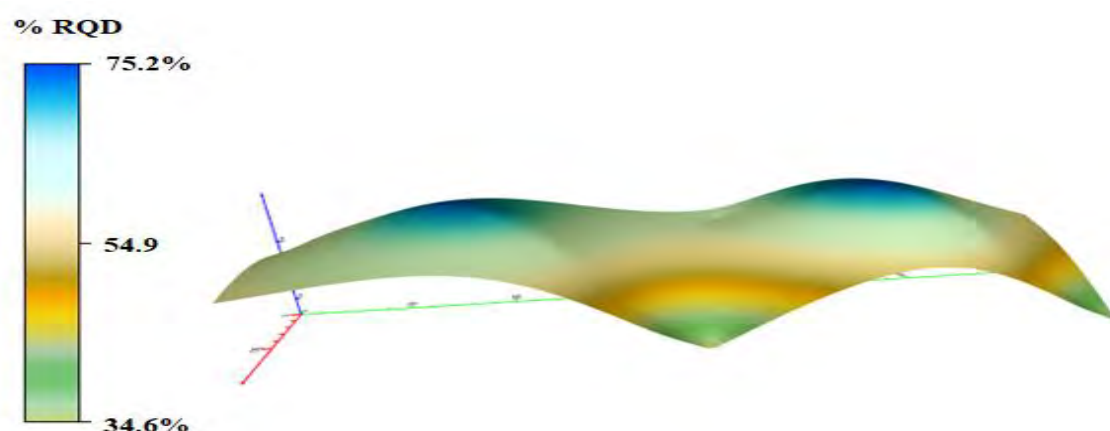
Distribución espacial de las ff/m en el macizo rocoso en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 74

Distribución espacial de %RQD, en el macizo rocoso en el área de estudio

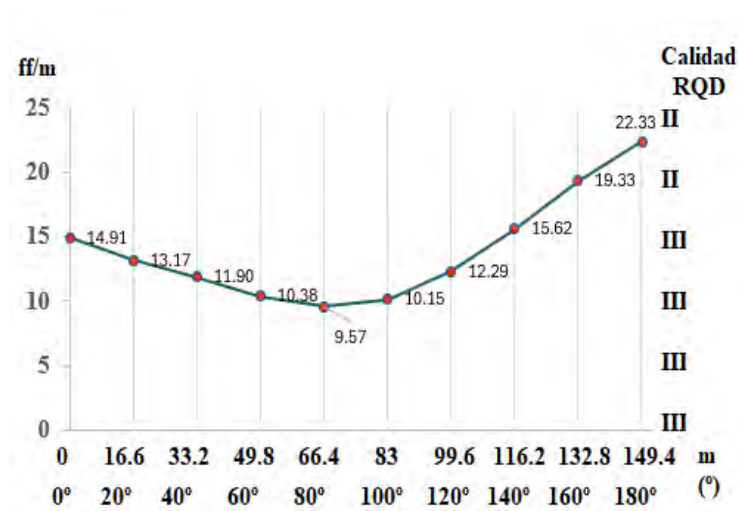


Fuente: Elaboración propia

Distribución espacial del %RQD del macizo rocoso obtenida a partir de las líneas de muestreo direccionales (azimut–buzamiento). La superficie muestra la variación de la calidad de la roca (Bieniawski) desde $\approx 34.6\%$ (peor) hasta $\approx 75.2\%$ (mejor). Colores fríos = RQD alto; colores cálidos = RQD bajo. Se trata de una interpolación; la precisión disminuye en zonas con menor densidad de datos.

Figura 75

Gráfico ff/m & ubicación en el macizo rocoso



Fuente: Elaboración propia

5.4. Análisis de sensibilidad y valoración probabilística del RQD.

Con el propósito de dar un valor estimativo probabilista a los valores de calidad de macizo rocoso se procedió a determinar cual es la tendencia en términos de FDP, de los valores de las frecuencias de fracturas para luego aplicar estos al análisis de sensibilidad.

Se evaluó la FDP, que siguen las λ_i , se realizó la prueba con este propósito con Shapiro-Wild el cual arrojó los siguientes resultados

<i>Test</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
Shapiro-Wilk W	0.898505	0.210954

Dado que el Pvalor >0.05 , que es el nivel de significancia estándar se concluye que los valores siguen de cerca una FDP. Normal con 95% de confianza

Los estadísticos dieron una media $\bar{X} = 13.96$ y una desviación estándar $S = 4.16072$ por lo tanto se tiene un intervalo de confiabilidad central de la media:

$$P(\bar{X} - 2S < \mu < \bar{X} + 2S) = 0.95$$

Dando como limites:

Límite inferior Li: 5.64

Límite superior Ls: 22.28.

Es decir, los valores del RQD, para el área de estudio estarán entre estos límites de variación de manera probabilística entre estos rangos

Tabla 36

Valores extremos con intervalo de confiabilidad del 95%

Li	Ls	RQDi	RQDs	RQDi Calidad	RQDs Calidad
6.6	23.2	85.8	32.5	IV	II
4.9	21.5	91.4	36.7	V	II
3.6	20.2	94.9	40.0	V	II
2.1	18.7	98.1	44.2	V	II
1.3	17.9	99.2	46.6	V	II
1.8	18.5	98.5	44.9	V	II
4.0	20.6	93.9	38.9	V	II
7.3	23.9	83.3	30.9	IV	II

11.0	27.6	69.8	23.7	III	I
14.0	30.7	59.1	18.9	III	I

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro N° 33 se tiene:

Li: Límite inferior.

Ls: Límite superior.

RQDi: Valor del RQD en función a Li.

RQDs: Valor del RQD en función a Ls.

Los valores del cuadro anterior muestran valores en términos probabilístico con un nivel de confiabilidad del 95%, pudiéndose construir tres escenarios para diversos propósitos:

Nivel Optimista los valores más altos de los RQDs.

Nivel Realista los valores promedios iniciales de los RQDs

Nivel pesimista los valores más bajos de los RQDs.

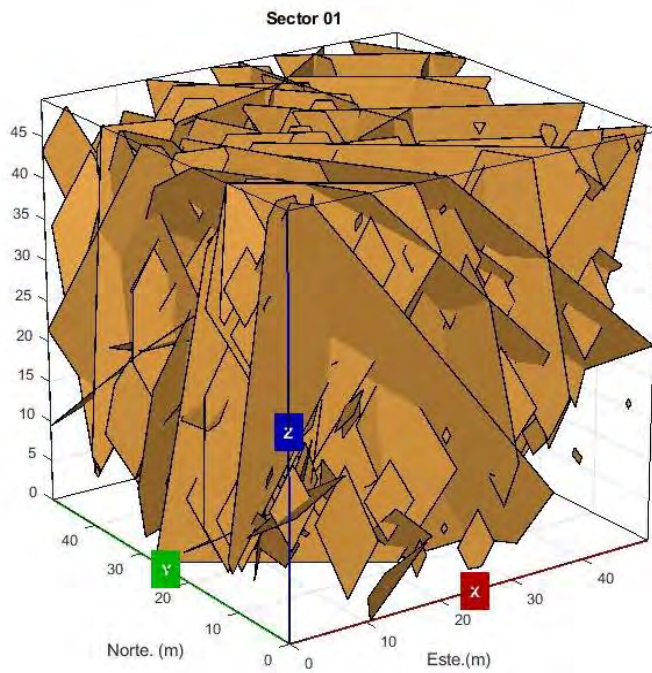
Este tipo de identificación de dominios geomecánicos a partir del RQD, en términos probabilísticos y no determinísticos, en mi opinión serian favorables a plantear diferentes estrategias para afrontar problemas geomecánicos en las áreas de ingeniería civil, o ingeniería minera.

Como una manera de mostrar los alcances de una evaluación probabilística se muestra las imágenes que muestran la distribución espacial de los tres sectores considerados en el presente estudio en la carretera San Jerónimo-Paruro km 12

Los gráficos fueron generados considerando la FDP de las fracturas en los tres sectores haciendo uso del software ADFNE 1.5. se consideran el número total de fracturas en cada sector y la FDP hallada durante el desarrollo del trabajo, las **fig 82,83 y 84** ayudan a visualizar la complejidad al abordar las fracturas de manera determinísticamente.

Figura 76

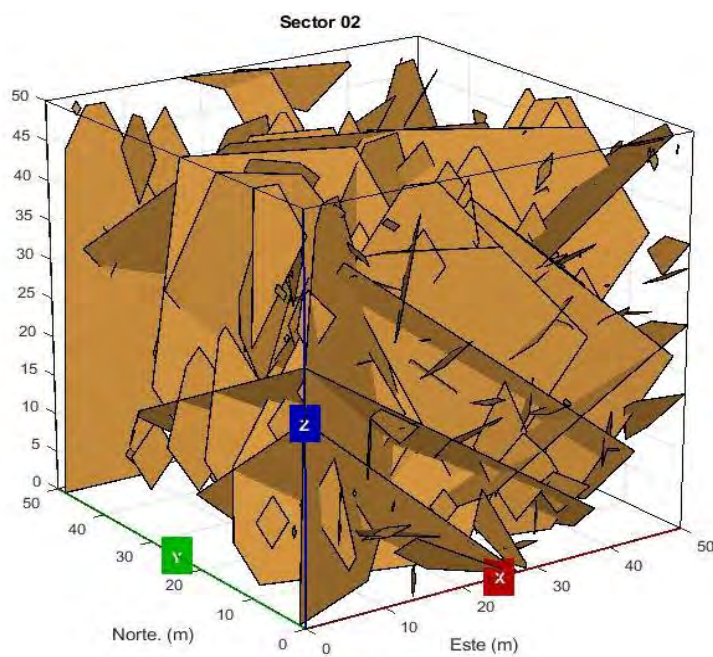
Modelo cubico sector 01 de fracturas macizo rocoso



Fuente: Elaboración propia

Figura 77

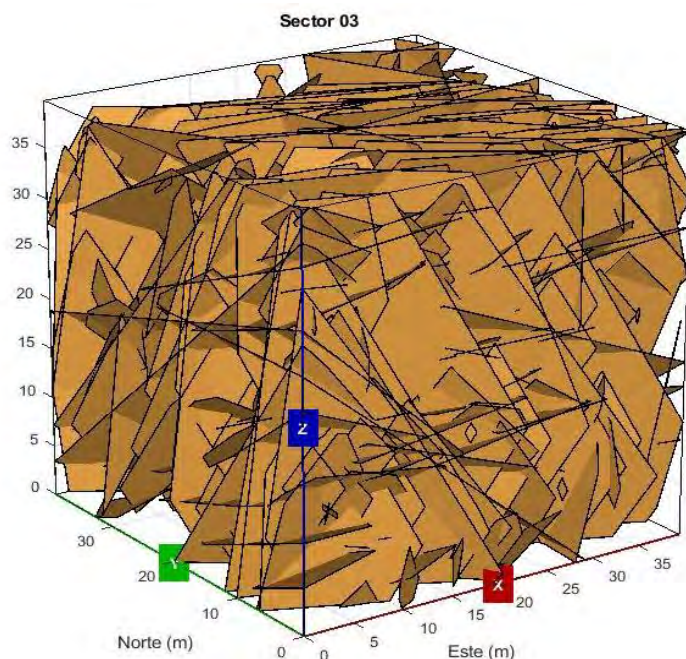
Modelo cubico sector 02 de fracturas macizo rocoso



Fuente: Elaboración propia

Figura 78

Modelo cubico sector 03 de fracturas macizo rocoso



Fuente: Elaboración propia

Interpretación de los resultados.

Para poder analizar el macizo rocoso se discretizó inicialmente en tres sectores la configuración morfológica del área lo imponía, esta discretización nos permitió realizar la colección de muestras y su posterior tratamiento a través del análisis estereográfico, para luego analizar con detalle cada sector en particular, con el objetivo de identificar las diferentes discontinuidades de las familias principales, de acuerdo con el análisis se pudo extraer lo siguiente:

Interpretación de resultados del RQD por la línea de detalle.

Tomando en consideración los datos del RQD sin sondeo a través de líneas de muestreo y considerando el procedimiento de cálculo para este tipo de procedimiento, tenemos los siguientes resultados a través de la figura N.º 66 se muestra cómo se valora el macizo rocoso, en el mismo frente de investigación, el talud; de acuerdo a la progresiva relativa inicial considerada tomada como referencia (relativa), desde la referencia inicial en el sector 01,

pasando acumulativamente pasando por los sectores 02 y concluyendo en la última referencia en el sector 03; acumulando la longitud total del área de evaluación pudiéndose considerar como un macizo rocoso con calificación III, que lo calificaría como roca de calidad media (roca levemente meteorizada) la longitud que abarca sería de 125 m desde la referencia inicial, y desde los 125 para adelante hasta llegar a los 149.5 m, es decir 25.5 m tendrían roca de calidad II, considerada mala (roca meteorizada) esta grafica es interesante para propósitos prácticos aplicativos para el uso que se requiera, nos ubica físicamente a que sector del talud carretero nos estamos refiriendo con la calificación.

5.5.1. Discusión de resultados

Se identificaron tres estructuras de familias (Sets), principales, en los sectores 01 y sector 03, y dos familias en el sector 02, en los tres sectores que se identificaron además en cada uno de ellos, fracturas aleatorias que no conforman un sets en sentido estricto, por ser muy dispersos, estos fueron posteriormente tratados como un tercer set para los sectores considerados a todos las concentraciones se les realizó una descripción cuantitativa de las estructuras (fracturas), que las conforman a través de medios gráficos estereográficos equiangular del hemisferio inferior (red de Schmidt), en estos se trabajó con los polos que favorecen a evaluar la variabilidad que presenta en orientación y buzamiento las estructuras que presenta el talud rocoso, así como histogramas para cuantificar sus características destacadas que sirvan en su evaluación posterior todas con el propósito de evaluar el motivo del presente estudio la representación de los polos se expresan en puntos de variada coloración para diferenciarlos, la dispersión de polos se debe a la variabilidad que presenta la orientación en las estructuras que presenta el talud rocoso y los posibles errores en el recojo de la data de campo.

La variabilidad de puntos planteados que se observa en los diagramas la densidad de polos, el que nos muestra con mayor detalle la agrupación estadística representada en el color amarillo, naranja y rojo.

Dentro del análisis cuantitativo se utilizó representaciones de histogramas para cada sector y para cada set, esto nos mostró la distribución estadística de los dipdirecion y dip; para cada sets hallado y en cada sector, esta data cuantitativa nos proporcionara valores como promedios, desviación estándar, valores superior e inferior, que posteriormente fueron utilizados para sectorizar el talud, a través de la longitud de la exposición de cada set en el talud para luego evaluar la densidades lineales λ_i , en los diferentes sectores para llegar a las estimaciones del cálculo del RQD a partir de la aplicación de la fórmula de Priest, la resultante determinó que el macizo rocoso tiene porcentajes que determina la calidad de la roca como valor de “muy bueno”, y “bueno”, en las primeras aproximaciones determinísticas, para las tres familias principales del macizo rocoso, estos valores sin embargo adolecían de un sesgo por lo cual se determinó realizar una corrección.

Luego de realizar el ajuste por sesgo como lo sugiere Rives (1992) se realizo las correcciones de las diferentes λ_i , incrementados los valores y por consiguiente la valoración del RQDs, para los diferentes sets determinados.

Dado que se tomo muestras en tres sectores forzada por la propia geometría del área en estudio se procedió a realizar la unificación como un todo, la información, por lo que se realizo test para considerarlo como una unidad, como resultado luego de ANOVA, se determinó que se podría considerar todo el área de estudio (149.5m), como una unidad, para luego realizara las nuevas concentraciones de discontinuidades en sets, identificando tres sets principales, las que interactuando entre las mismas determinaran tres líneas de intersección para las cuales se determinó las densidades lineales de fracturas respectivas λ_i , con estos valores parciales se pudo identificar valores máximo y mínimos relativos, de densidades lineales en el área de

evaluación para los mismos se evaluó los respectivos RQDs, para la identificación de los valores mínimos y máximos globales sin embargo no eran suficientes, por lo mismo se realizaron, 10 líneas de muestreo virtual, que nos proporcionaran los valores máximos y mínimos de densidades de discontinuidades en el macizo rocoso de la carretera San Jerónimo – Paruro Km 12. esta vez para todo el área del macizo rocoso estos valores y su distribución espacial son mostrados a través de figuras para mostrar sus fluctuaciones, estos valores hallados son de carácter determinístico por lo que se procedió a realizar una evaluación de tipo probabilístico para valores del 95% de confiabilidad para los valores del % RQD, en todo el área, como parte del mismo se ilustra a través de representaciones cubicas 3d, para mostrar de acuerdo al número de fracturas para cada sector y la distribución de probabilidad respectiva la variabilidad considerada para concluir se tiene:

De acuerdo con el Objetivo General.

en este estudio de halló para el caso específico del talud carretero que la valoración cuantitativa y calificación cuantitativa, de acuerdo al cuadro 01 dio los valores que, se muestra en la tabla N.º 26 “líneas de muestreo para todo el área de estudio”, y que es considerada como roca de calificación III con rango de valores entre 51 a 75%, con calidad de roca Media, e identificación cualitativa de (roca levemente meteorizada) y tipo II con rango de valores que abarcan de los 25 a 50%, con una calidad de roca mala, y con identificación de (roca meteorizada), el autor Gálvez(219), en su estudio concluye que el RQD, para algunos sectores de su estudio presenta valores $< 50\%$ mientras en otro sector los valores son $> 50\%$; en este aspecto debemos ver que considerando espacios geológicos distintos se observa diferencias en los valores del RQD, por lo tanto podríamos colegir que son coherentes los resultados hallados en el estudio que ratifica la heterogeneidad del espacio geológico, observar que es muy difícil comparar realidades o dominios geológicos, en distintos espacios geológicos la naturaleza

altamente anisótropa por definición de la geología lo hace imposible, en un espacio tan reducido como el estudio ya se encuentran discrepancias en sus valoraciones.

En el objetivo específico 01.

se muestra en las figuras N.º 43, para el sector 01 del área de estudio, figura N.º 44, para el sector 02 y figura N.º 45 para el sector 03 del estudio se puede observar como para cada uno de estos sectores los set hallados son diferentes para cada uno de igual manera las extensiones en los frentes de los taludes respectivos, esto evidentemente por la variación de las frecuencias localizadas de las frecuencias, que otra vez y para ratificar muestra el carácter altamente anisótropo del dominio geológico.

En el objetivo específico 02.

En el estudio además de la valoración puntual determinística de los valores mostrados en la tabla N.º 26, y mencionado en el objetivo 01, se muestra la valoración probabilística al 95% de confiabilidad de los valores de los RQDs para el área de estudio estos se muestran en la tabla N.º 33, en la que se muestra las fluctuaciones con límites superiores e inferiores de los valores del RQD, es decir un rango de variación, y no un punto fijo, muy discutible además por lo ya expresado la alta anisotropía del universo geológico en general y específicamente en el área de estudio.

5.4 Presentación de resultados

En el análisis del RQD en la zona de San Jerónimo – Paruro km 12, se realizaron diferentes procesamientos que permitieron evaluar diferentes características del macizo rocoso; dentro de ellos se aplicó en el Dips v7 el procesamiento de la data de campo, también se procedió a calcular el RQD sin sondeo y se aplicó la validez de la data aplicando el SPSS v25, Jasp, de los cuales se obtiene los siguientes resultados:

En cada uno de los análisis realizados mediante el uso del software Dips, línea de detalle y análisis del SPSS, se logra obtener diferentes características resultantes producto de la

sistematización y cálculo aplicado del RQD, cuyos resultados tienen una tendencia a se encuentran dentro de una tendencia de un sector de 125m con roca calidad III que representa el 83% del total, y 24.5 m con mala calidad que representa el 17%; para el caso de en cuanto a la calidad de roca evaluada.

El análisis del RQD arrojó y bajo el análisis determinístico, que, existe una mayor agrupación al nivel III, del macizo rocoso los cuales guardan concordancia en gran parte del talud.

La alteración por consiguiente al macizo rocoso es leve, la investigación evaluó el tipo de RQD, precisando que la zona presenta características geológicas y geomecánicas singulares, el cual sugiere que la mayoría de las rocas sedimentarias tienden a formar un tipo de estructuras con comportamientos similares

Con las pruebas de hipótesis estadísticas se demostraron tanto la existencia de relación lineal muy fuerte entre las dos variables materia de estudio

CONCLUSIONES

Con base de la data recogida en campo y el procesamiento de datos en el Dips v7, SPSS, JASP y Statgraphhics, los cuales se representan en tablas, figuras; permiten obtener las siguientes conclusiones:

1. Para el objetivo general se llega muestra que la investigación confirmó la viabilidad operativa de estimar la Designación de Calidad de Roca (RQD) en taludes viales sin recurrir a testigos de perforación diamantina, empleando únicamente parámetros estructurales observables in situ (densidad lineal y espaciamiento de discontinuidades). Para ello se ejecutó un levantamiento estructural de 900 discontinuidades a lo largo de 149,5 m de frente rocoso del talud ubicado en el km 12 de la vía San Jerónimo–Paruro, sectorizado en tres tramos de análisis.

Los resultados indican que aproximadamente el 83 % del talud (≈ 125 m) presenta una calidad geomecánica catalogada como “media” (calificación III), asociada a roca levemente meteorizada, mientras que cerca del 17 % restante ($\approx 24,5$ m) corresponde a roca de “mala calidad” (calificación II), vinculada a meteorización más intensa. Cuando se incorpora el análisis probabilístico con intervalos de confianza del 95 %, se identifican dominios locales que pueden variar desde “muy mala” (calificación I) hasta “muy buena” (calificación V), lo que evidencia que el macizo no es homogéneo y que existen zonas críticas con mayor susceptibilidad geotécnica que deben ser priorizadas en la gestión vial.

El esquema de estimación adoptado basado en la correlación tipo Detail Line propuesta por Priest & Hudson, demostró ser adecuado para generar cartografía temática de calidad estructural del macizo, con resolución suficiente para apoyar decisiones de priorización de conservación, estabilización localizada y monitoreo preventivo en infraestructura vial andina.

2. Para el objetivo específico 01, el análisis estructural permitió identificar y unificar los sistemas de fracturas (“sets”) presentes en los tres sectores del talud, determinando orientaciones, buzamientos y frecuencias de ocurrencia. A partir de esa caracterización se generó un conjunto de 10 líneas de muestreo simuladas, con variación sistemática del azimut (0° – 180°) y del buzamiento (0° – 90°), con el fin de evaluar cómo la orientación del “corte de lectura” condiciona la frecuencia lineal de fracturas (λ , ff/m). Se observó que las máximas densidades de fracturamiento se concentran en direcciones cercanas al eje aproximado Norte–Sur del macizo, mientras que los valores mínimos se registran alrededor de un azimut cercano a 59° , lo que implica menor interceptación de las familias de discontinuidades dominantes.

Este procedimiento se sustentó en la intersección geométrica entre los sets estructurales identificados en campo y la obtención de líneas resultantes mediante álgebra vectorial y geometría esférica, lo que permitió interpretar el macizo como un medio fracturado anisótropo continuo y no como tres tramos independientes.

Se demuestra, por tanto, que la orientación de lectura no es neutra desde el punto de vista geomecánico: la dirección en la que se mide la frecuencia de fracturas controla el valor obtenido de λ y, en consecuencia, condiciona la valoración posterior del RQD. Esto confirma que la estructura interna del macizo (familias de discontinuidades, buzamientos, persistencia) influye directamente en la percepción y clasificación de su calidad.

3. Para el objetivo específico 02, Se obtuvo la distribución espacial del %RQD para cada sector y para el tramo completo, generándose productos cartográficos que distinguen dominios con mejor y peor comportamiento geomecánico relativo dentro del mismo talud. La zonificación evidencia que el Sector 02 concentra valores de RQD más elevados (del orden de 92 % a 97 %), compatibles con una clasificación entre “buena” y “muy buena”, mientras que el Sector 03 registra valores inferiores (del orden de 68

% a 74 %), correspondientes a una calidad “regular”. Esto confirma que, aun dentro de un único talud vial en continuidad geomorfológica, la competencia geomecánica del macizo puede variar de manera significativa en distancias cortas.

Paralelamente, el tratamiento probabilístico mediante intervalos de confianza al 95 % permitió expresar el RQD no solo como valor puntual, sino como rango estadísticamente sustentado (escenario pesimista, más probable y optimista) para cada dominio geomecánico. Con ello, el RQD deja de ser únicamente un índice descriptivo y pasa a constituirse en un insumo de planificación de mantenimiento y gestión de riesgo, útil para la priorización de intervenciones sobre los segmentos menos competentes del talud.

En síntesis, la cartografía de RQD y de densidad de fracturas generada constituye una herramienta de lectura rápida para autoridades viales, ya que orienta la asignación de recursos de estabilización y monitoreo hacia los subtramos con comportamiento geomecánico más desfavorable, en lugar de tratar todo el talud como una unidad homogénea.

4. Para el objetivo específico 03, Se determinó que la densidad lineal de fracturas (ff/m) actúa como variable explicativa directa del índice RQD. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue $r = -0.998$, lo que evidencia una asociación negativa prácticamente perfecta: el incremento de la frecuencia de discontinuidades por metro se traduce en una disminución sistemática del porcentaje de RQD.

Antes de la correlación se verificó la normalidad estadística de ambas variables (ff/m y %RQD), con valores de significancia superiores a 0,05, dentro de la banda de confianza del 95 %, habilitando el uso de estadística paramétrica clásica.

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias estadísticamente significativas entre grupos de calidad de roca definidos por rangos de RQD (por ejemplo, dominios en torno a 25–50 % frente a dominios en torno a 51–75 %), con $F = 24,15$ y $p = 0,001$, y una magnitud de efecto elevada ($\eta^2 \approx 0,75$). Esto implica que las variaciones en la categoría geomecánica del

macizo (de “mala” a “media/buena”, por ejemplo) están asociadas a variaciones sustanciales en la fracturación.

Este comportamiento se mantiene robusto incluso bajo niveles de significancia más estrictos ($\alpha = 0,05; 0,01; 0,001$), sosteniendo el rechazo de la hipótesis nula con riesgo de error tipo I menor al 1 % e, incluso, menor al 0,1 %.

En términos de ingeniería geotécnica aplicada, esto significa que la frecuencia de fracturas no es únicamente un descriptor geométrico del macizo rocoso, sino un predictor cuantificable y estadísticamente validado de la categoría de calidad asignable al talud cuando se emplea el RQD como parámetro de condición estructural para gestión de activos viales.

Validación Técnico-Académica y Robustez Estadística.

- **Conclusión 1(Validación del Modelo Geomecánico %RQD):**

Para dar validez a todo lo desarrollado en la presente investigación, se procedió a realizar una rigurosa validación técnico-académica del modelamiento geomecánico de la variable de designación de calidad de roca (%RQD) a lo largo del talud de la carretera San Jerónimo - Paruro (Km 12, Prog. 0+000 a 0+149.5), cuyos resultados analíticos detallados se encuentran expuestos en la sección de **Anexos**. Esta confrontación matemática, realizada en los puntos de control (PC-01, PC-02 y PC-03) frente al modelo probabilístico de *Priest & Hudson*, determinó un **Error Promedio Global (E_g) de apenas el 2.94%** y una **Confiabilidad Global del Sistema del 97.06%**. Al no superar el umbral límite del 5.0% de error en ninguno de los tramos evaluados, el modelo se categoriza bajo el nivel de "**Validación Óptima (Nivel Excelente)**" conforme a los estándares de la ISRM y Hoek & Brown, certificando que los isovalores de calidad de roca son matemáticamente fidedignos para el diseño de ingeniería final.

- **Conclusión 2 (Soporte Metodológico y Representatividad del Muestreo):**

Para dar validez a la representatividad del muestreo lineal constante ($L_m = 5.0$ m) implementado para el registro por *Detail Line*, se contrastó su diseño bajo fundamentos teóricos y normativos internacionales. Mediante la aplicación del Teorema del Límite Central (Cochran, 1977), se demostró estadísticamente que dicho soporte físico garantiza un error absoluto real admisible de $\pm 4.38\%$, situándose holgadamente dentro del rango de aceptación geotécnica. Asimismo, desde la perspectiva geoestadística, la ventana de 5.0 m se posiciona por debajo de la longitud de correlación típica del macizo (10 m a 15 m), previniendo el efecto de "sobre-suavizado" y permitiendo capturar de manera óptima las variaciones locales del fracturamiento estructural, en estricta alineación con la norma **ASTM D6032**.

- **Conclusión 3 (Robustez Estadística y Significancia del ANOVA):**

Para dar validez definitiva a la consistencia del modelo frente a sesgos o deformaciones geométricas, se sometieron los datos de la validación a un Análisis de Varianza (ANOVA), demostrando que el algoritmo de estimación es altamente robusto y espacialmente estable. Las pruebas de hipótesis y significancia estadística resultaron concluyentes al confirmar que las diferencias entre los valores estimados y los analíticos teóricos no son significativas, sosteniendo la robustez de la validación no solo bajo el nivel de confianza estándar de $\alpha = 0.05$, sino superando con éxito los niveles de exigencia científica más estrictos de $\alpha = 0.01$ y $\alpha = 0.001$ ($p < 0.001$). Esto certifica que las mínimas variaciones observadas corresponden únicamente al ruido instrumental propio de la medición en macizos rocosos y no a fallas metodológicas, consolidando la solidez científica de la propuesta metodológica detallada en el **Anexo** del presente trabajo.

RECOMENDACIONES

Se recomienda intervenir de manera prioritaria los subtramos con menor calidad geomecánica (aproximadamente el 17 % del talud, clasificado como roca de calidad baja), ya que presentan mayor grado de meteorización, alta densidad de fracturas y valores reducidos de RQD. En estos tramos se debe ejecutar retiro de bloques sueltos, control y encauzamiento de escorrentías superficiales para limitar la infiltración en las juntas, y, cuando corresponda, la instalación de soporte puntual (anclajes, mallas u otros elementos de sujeción localizada). Además, estos mismos subtramos deben ser sometidos a una inspección periódica específica, porque se comprobó que la disminución del RQD está directamente asociada al incremento de la fracturación; es decir, cualquier apertura adicional de discontinuidades en esas zonas puede acelerar la degradación del macizo y aumentar la probabilidad de desprendimientos hacia la vía.

Se recomienda gestionar el talud de manera sectorizada y no asumir un comportamiento promedio único para todo el tramo. Los sectores con RQD alto, asociados a roca clasificada como de buena o muy buena calidad estructural, pueden mantenerse bajo control rutinario, mientras que los sectores con RQD más bajo y condición “regular” o “mala” deben tener prioridad técnica y presupuestal. Esta diferenciación permite dirigir recursos de estabilización, drenaje superficial y seguimiento geotécnico hacia las zonas menos competentes del macizo, evitando intervenciones generalizadas donde no son necesarias. En términos de gestión vial, esto implica que la conservación y la vigilancia del talud deben programarse por dominios de calidad estructural claramente delimitados y no como una única unidad homogénea.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, F. (2020). *MODELAMIENTO GEOESTADÍSTICO DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI (RMR)*. Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176858/Modelamiento-geoestadistico-de-la-clasificaciob3n-geomeca1nica-de-Bieniawski-%28RMR%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Balladares, M. (2025). *INVESTIGACIÓN DE FACTORES DE INESTABILIDAD DE TALUDES EN LADERAS MONTAÑOSAS COMPLEJAS Y MEDIDAS DE ESTABIILIZACIÓN, EL BOSQUE- PUQUIN CUSCO-2022*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12918/10920>
- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y aplciada*. Lima: UPC.
- Betancur Arenas, B. L., & López Balaguera, C. E. (2019). *Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel veintiuno de la mina La Maruja (distrito minero de Marmato, Caldas) para estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte en la excavación y su correlación con las alteraciones*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Blanco Moreno, D. C., & Cepeda Gómez, Diana I. (2015). *Análisis y evalaución comparativa del método chino "Basic Quality" BQ y los métodos "RMR" y "Q" para la clasificación de macizos rocosos*. Bucaramanga: Universidad Santander.
- Bordehore, L. J. (2008). *La minería de los metáles en la provincia de Madrid: Patrimonio minero y puesta en valor del espacio subterráneo*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

- Boretek. (2021). Determinación del RQD. *Determinación del RQD*, (pág. 2). Recuperado el 17 de 09 de 2021, de <https://boretek.pe/geotecnia-y-geomecanica/determinacion-del-rqd>
- Cabrera Car, M. M. (2010). *Influencia de la Persistencia de una familia de Discontinuidades en la estabilidad frente al deslizamiento de una presa de Gravedad*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Cañapataña Ccora, A. M. (2019). *Determinación de las condiciones del macizo rocoso en la profundización del avance en la zona esperanza del nivel 23 mediante un análisis geomecánico en la unidad minera Americana de CÍA. minera Casapalca*. Puno: UNA.
- Carlotto, V. (2016). Dataciones por trazas de fisión en los depósitos continentales terciarios de la región de Cusco. *ResearchGate*, 521-524.
- Carrasco Diaz, S. (2019). *Metodología de la Investigación Científica*. Lima: Editorial San Marcos.
- Cartaya Pire, M. (2006). Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país. *Minería y Geología*, 22(3).
- Cerdas Olaya, J. M. (2013). *Uso de la clasificación geomecánica utilizando el método RMR para la estimación preliminar de los requerimientos de sostenimiento de los taludes en el cerro La Potra del proyecto Hidroeléctrico Bajo Frio, República de Panamá*. Panamá: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Chambi Tapahuasco, G. M. (2015). *Estudio de Estabilidad de Taludes en los macizos rocosos de la carretera Ticaco Candarave en las progresivas: 124+560 A 129+00 KM*. Tesis, Tacna.
- Churata Mestas, J. F. (2019). *Estudio del comportamiento geomecánico del macizo rocoso*. Puno: UNA.

- Cipriano Chudán, R. R., & Marín Cabrera,, E. E. (2018). *Propuesta de sostenimiento en base a la caracterización geomecánica de la galera Nv. 9, unidad minera Colquirrumi, Cajamarca, 2018*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Collazos, L. (2024). *Estudio de la estabilidad del macizo rocoso, medidas de mejora y protección delo Cerro Colorado de la provincia de Bagua, departamento de Amazonas- 2022*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12423/7220>
- Conicet. (s.f.). *Meteorología* . Obtenido de <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Meteorolog.htm>.
- Correa Villa, E. (2014). *Resistencia de las discontinuidades rocosas al esfuerzo constante*. Medellin: Universidad E.A.F.T.
- Deere, D., & Deere, D. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *West Conshohocken, PA: ASTM International*, 91-101.
- Delgado Madera, F. (2011). *Evaluación Ingeniero - Geológica del cerro Picol*. Cusco: INGEMMET.
- Duque Escobar, G. (31 de 07 de 2017). *Manual de geología para Ingenieros*. Obtenido de Macizo Rocosos: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>
- Eadic: *Formación y Consultoria*. (27 de enero de 2021). Obtenido de Clasificación geomecánica de Deere. Índice RQD: <https://www.eadic.com/clasificacion-geomecanica-de-deere-indice-rqd-1967-parte-1a/>
- España, M. d. (2000). *Técnicas Geofísicas*. España: Gobierno de España. Obtenido de <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/C63444EB-3A5F-4346-9CE0-AF209AB125F1/132409/ENSAYOSGEOFISICOS.pdf>
- Explorer, S. (8 de 24 de 2021). *Designación RQD para Macizos Rocosos - Smartx Explorer*. Obtenido de <https://smartxexplorer.com/designacion-rqd-para-macizos-rocosos/>

- Fernández Gutierrez, J., Pérez Acebo, H., & Mulone Andere, D. (2017). orrelación entre el índice RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton en formaciones sedimentarias de grano fino. *Informes de la Construcción*, 69(547). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3989/id54459>.
- Gálvez Caballero, J. O. (2019). *Estimación geoestadística del RQD, RCU, JRC y densidad aplicada a entender el comportamiento geomecánico del cerro la falda, la encañada – cajamarca, 2019*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- García, R. (2023). *ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA STRUCTURE FROM MOTION PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS*. Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de https://oa.upm.es/81191/1/RAMIRO_GARCIA_LUNA.pdf
- González de Vallejo. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson. Pretice Hall.
- Hergenrether Pérez, P. D. (2017). *Consideraciones geomecánicas en el diseño de secciones tipo para un túnel minero*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Hernández Sampieri, H., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Invesrtigación Cientifica 6ta edicion* (6ta ed.). Mexico: Interamericana Editores, S.A.
- Historia, I. P. (Enero - Diciembre de 2011). Comisión de Geofísica. *Revista Goefísica*(63). Recuperado el 2 de setiembre de 2021, de https://www.ipgh.org/assets/geof_63.pdf
- Hong, K., Han, E., & Kang, K. (2017). Determinación del índice de resistencia geológica del macizo rocoso articulado basadosobre el procesamiento. *Jouenal Of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 702-708.
- Huallpa Ayte, D. (2019). *Identificación y evaluación de factores geotéctonicos que causan la inestabilidad de ladera en la quebrada de Qolcohuaycco, urbanizaci´n Santa Rosa, distrito de San Sebastian*. Cusco: Universidad Andina.

- J.A., P. S. (1976). Discontinuity spacings in rock. *Int. J. Rock Mech.Min. Sci & Geomech.Abstr*, 135-148.
- Jiménez, M. F., Villalta-Echeverría, M., Murillo-Lozano, I., Escobar-Segovia, K., & Mulas, M. (2019). Caracterización geotécnica y estructural de las Ignimbritas del grupo Saraguro en el sector de Santa Isabel-Pucará, Ecuador. *Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL*, 8.
- Llamactanta Marchena, J. E. (2018). *Estimación del comportamiento de parámetros geomecánicos aplicando técnicas geoestadísticas en la concesión Mi Grimaldina 1, caserío de Piñipata, Hualgayoc-Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- M.S., W. P. (1980). Discontinuity spacings in a crystalline rock. *Int.J.Rock Mech.Min Sci.& Geomech.* , 63-66.
- Maldonado, Y. (28 de marzo de 2018). *Geologiaweb*. Obtenido de RQD, designación de la calidad de la roca: Ingeniería Geológica: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/rqd/>
- Mamani, Y. (2023). *EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DE LA MINA 9-10 DE SHOUGANG HIERRO PERÚ*. Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19537>
- MTC. (2018). *Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú*. (D. G. Ferrocarriles, Ed.) Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/mtc%20normas/arch_pdf/man_7%20sggp-2014.pdf
- Mucuta Lito, H. V., Cartaya Pire, M., & Cuni Calzada, J. (2019). Evaluación geomecánica del macizo rocoso en frentes de explotación del yacimiento polimetálico Castellanos. *Minería y Geología*, 330-440.

- Ñaupas Paitán, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., & Villagómez Paucar, A. (2014). *Metodología de la Investigación*. Bogotá: Ediciones U.
- Osinergmin. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para el diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Lima: Osinergmin.
- Portilla Yépez, V. (2019). *Los estudios de proyección para la explotación minera*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Priest, S. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer Science & Business Media.
- Quispe Altamierano, M., & Quispe Yuca, W. (2021). *Análisis y determinación de la correlación entre el módulo de rotura y el esfuerzo a la compresión axial para pavimentos rígidos con agregados de las canteras de Huillque, Huambutio y Pisac - 2017*. Cusco: UNSAAC.
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monje, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez Malaver, J. V. (2019). *Estudio geotécnico para tajo, Proyecto Corocchohuayco - Cusco - Perú*. Lima: Universidad San Marcos.
- Rodríguez Sastre, A. (2003). *Caracterización Geomecánica de materiales pizarrosos del sinclinal de truchas (León - Orense)*. Madrid: Universidad de Oviedo.
- S.D., H. J. (1979). Discontinuity and rock mass geometry. *Int.J.Rock Mech.Min Sci.& Geomech.*, 339-362.
- Saricam, T., & Ozturk, H. (2018). Estimación del RQD mediante análisis de imágenes digitales utilizando un método basado en sombras. *Revista Internacional de Mecánica de Rocas y Ciencias de la Minería*, 253-265.
- Seguret, S., & Guajardo, C. (2015). Geostatistical Evaluation of Rock-Quality Designation and its link with Linear Fracture Frequency. *IAMG*, 5-13.

- SGS. (2021). *Minería: Análisis de roca total* . Obtenido de <https://www.sgs.pe/es-es/mining/analytical-services/geochemistry/x-ray-fluorescence/whole-rock-analysis-major-elements-xrf76c>.
- Software., F. (s.f.). *Proyección estereográfica*.
<https://doi.org/https://www.finesoftware.es/ayuda-en-linea/geo5/es/proyeccion-estereografica-01/>
- Solano Martinez, N. F. (2016). *Enfoque para la zonificación geomecánica de macizos rocosos aplicado a explotación minera a tajo abierto (Minas Pasdelrío S.A.)*. Colombia: Iniversidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Unam, P. (s.f.). *Ptolomeo Unam*. Obtenido de CAPITULO 3. FRACTUAMIENTO:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/109/A6.pdf>
- Villablanca Yakcich, M. F. (2018). *Aplicación de métodos geomecánicos en la evaluación de la susceptibilidad a caída de rocas – análisis de casos en tres sectores de Playa Ancha, región de Valparaíso*. Viña del Mar: Universidad Andres Bello.
- Villamil, R. (2010). *Principios Básicos: Sistemas de Clasificación Macisos Rocosos*. Bogotá.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Título: Análisis de la designación de la calidad de la roca en la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12, 2022

PROBLEMAS	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
	GENERAL		VARIABLE INDEPENDIENTE	1. TIPO: • No experimental
• ¿Cómo estimar y cartografiar la designación de calidad de roca (RQD) sin sondeo en el talud rocoso de la carretera San Jerónimo-Paruro, km 12, a partir de parámetros estructurales medibles (frecuencia y espaciamiento de fracturas)?	• Desarrollar y aplicar un modelo empírico local para estimar y cartografiar el RQD sin sondeo en el talud km 12, usando frecuencia y el espaciamiento de fracturas.	• Existe una correlación lineal inversa y significativa entre la frecuencia y el espaciamiento de fracturas y el %RQD estimado sin sondeo en la carretera San Jerónimo – Paruro km 12.	• Fracturas del macizo rocoso DIMENSIONES: • Talud del macizo rocoso • Número de fracturas	2. NIVEL: • Descriptivo, correlacional y explicativo 3. DISEÑO: • No experimental
	ESPECÍFICOS		VARIABLE DEPENDIENTE:	4. MUESTRA: • Macizo rocoso km 12 San Jerónimo – Paruro.
• P1. ¿Cuál es la caracterización estructural (frecuencia, orientación e inclinación/buzamiento) de las fracturas por sectores en el talud km 12?	• O1. Caracterizar la frecuencia, la orientación y la inclinación de las fracturas por sectores en el talud km 12.	H1. La orientación y la inclinación de las fracturas presentan patrones predominantes por sector que evidencian heterogeneidad estructural en la carretera San Jerónimo – Paruro km. 12.	• Análisis RQD de roca DIMENSIONES: • Condiciones de la roca • Grado de fracturación	5. TÉCNICA: • Trabajo de medición directa en campo (scanline/Detail Line)
• P2. ¿Cuál es el valor promedio y el valor más probable del %RQD, y cómo se distribuye espacialmente por sectores y en el tramo completo, estimado sin sondeo mediante la metodología Detail Line?	• O2. Estimar y cartografiar el %RQD (valor promedio y valor más probable) por sectores y para el tramo completo, mediante la metodología Detail Line.	• H2. El %RQD estimado sin sondeo presenta diferencias significativas entre sectores y una distribución espacial no uniforme a lo largo del tramo.		6. INSTRUMENTOS: • Plantilla de toma de datos; software DIPS; brújula; wincha
• P3. ¿Qué relación existe entre la densidad/frecuencia de fracturas y el %RQD estimado sin sondeo en el talud km 12?	• O3. Cuantificar la relación entre densidad y la frecuencia de fracturas y el %RQD mediante análisis de correlación y regresión, verificando normalidad y linealidad.	• H3. La densidad y la frecuencia de fracturas están asociadas con el %RQD estimado sin sondeo en la carretera San Jerónimo – Paruro km 12.		

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Cálculo vectorial

CALCULO VECTORIAL ANGULO ENTRE INTERSECCIONES Y SETS, Y CALCULO DE FRECUENCIA FRACTURAS A LOS LARGO ESTAS												
Estereograma							Linea de muestreo (1,2 y 3)			Set de Fracturas		
Linea de Muestreo		Set estandar		Set normalizados		Sx	Sy	Sz	nx	ny	nz	
αs	βs	αn	βn	$\alpha n+180$	$\beta n-90-\beta$	$\cos \alpha s * \cos \beta s$	$\sin \alpha s * \cos \beta s$	$\sin \beta s$	$\cos \alpha n * \cos \beta n$	$\sin \alpha n * \cos \beta n$	$\sin \beta n$	
Linea 01	189.2	26	138	38	318	52	-0.887232198	-0.14370026	0.438371147	0.45752564	-0.411957936	0.788010754
Linea 02	135.5	38	173	27	353	63	-0.562049024	0.552324038	0.615661475	0.450606523	-0.055327524	0.891006524
Linea 03	225.1	17	157	40	337	50	-0.67502834	-0.677388756	0.292371705	0.591689114	-0.251157128	0.766044443
						Com x ;Linea*Com x ;fra	Com y ;Linea*Com y ;fra	Com z ;Linea*Com z ;fra				
						Sx*nx	Sy*ny	Sz*nz	Suma	Cos δ	δ	
						-0.405931479	0.059198462	0.345441178	-0.001291839	90.07401693	89.9	
Linea muestreo 01 con 3 sets						-0.399792616	0.00795058	0.390591552	-0.001250485	90.07164752	89.9	
						-0.524965634	0.036091345	0.335811781	-0.153062508	98.80444532	81.2	
						Sx*nx	Sy*ny	Sz*nz	Suma	Cos δ	δ	
						-0.257151839	-0.227534271	0.485147863	0.000461753	89.97354349	89.9	
Linea muestreo 02 con 3 sets						-0.253262957	-0.030558722	0.548558391	0.264736713	74.64869116	74.6	
						-0.332558289	-0.138720119	0.471624052	0.000345644	89.98019607	89.9	
						Sx*nx	Sy*ny	Sz*nz	Suma	Cos δ	δ	
						-0.308842773	0.279055674	0.230392047	0.200604948	78.42766303	78.4	
Linea muestreo 03 con 3 sets						-0.304172174	0.037478243	0.260505096	-0.006188834	90.35459636	89.6	
						-0.399406921	0.170131014	0.22396972	-0.005306187	90.30402352	89.7	
						Aporte los 3 sets linea interseccion 1	Aporte los 3 sets linea interseccion 2	Aporte los 3 sets linea interseccion 3				
						Fracturas	Fracturas line 1	Fracturas line 2	Fracturas line 3			
Set-01	17.7						0.030892312	0.030892312	3.559079204			
Set-02	5.8						0.010122905	1.540225481	0.04049131			
Set-03	4.2						0.642540512	0.007330379	0.021991048			
						0.683555729	1.578448173	3.621561562				

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Fracturas globales

Fracturas de los tres ejes de intersección extendidos de 0° a 360° de Azimut y 0° a 90° de buzamiento de la tesis

Valores Medidos												
β		α		Valores Med		αn		βn				
Dip		Dipdir		ff/m		α+180		90-β				
Set-01	38	138		17.7	318				52			
Set-02	27	173		5.8	353				63			
Set-03	40	157		4.2	337				50			
Set-04	0	0		0	0				0			
Cos δ=(αs-an)*cosβs*cosβn+senβs*senβn)												
FRACTURAS POR LINEAS MUESTREO & SET DE FRACTURAS												
αsβs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
βs												
αs												
β												

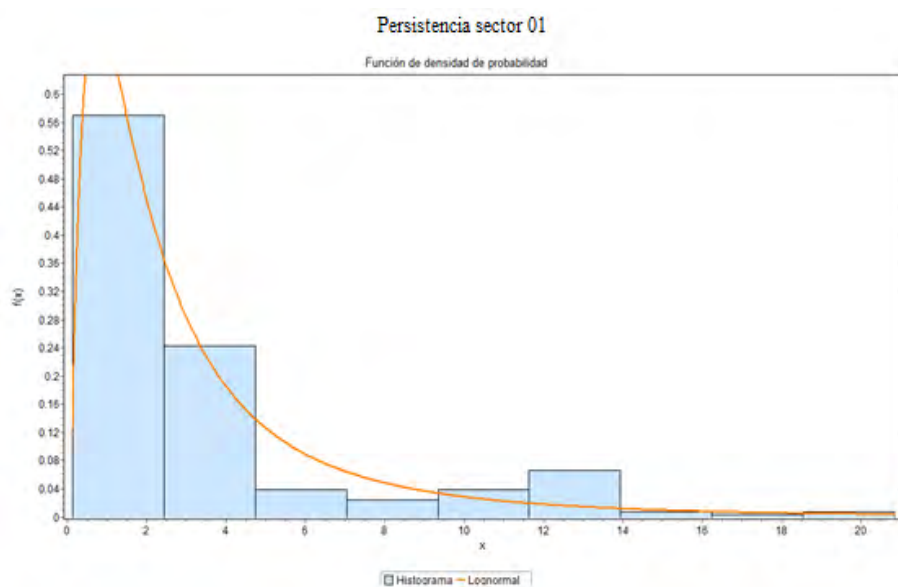
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Instrumentos de recolección de información

El instrumento que se usó para organizar el recojo de información, se aplicó un cuadro Excel el cual permitió ingresar la información para determinar los diferentes datos del macizo rocoso:

Formato de mapeo geomecanico							
Lugar : Carretera San Jeronimo-Paruro Km. 12+150 - Taludes. Estacion : 01 Hoja : 01 Fecha : 06-junio-2016 Por : J.V.T.							
Tipo Roca: Arenisca. Proposito : RQD. Azimut : S45°W Buzamiento : 0°							
N°	Hoja N°	sector	Dist (m)	Tipo	Orientación (°)		(m)
					Dip	DipDir	Persistencia
1	1 de 1	1	1.1	j	46	40	0.3
2	1 de 1	1	1.23	j	72	67	5.2
3	1 de 1	1	1.29	j	64	265	3.5
4	1 de 1	1	1.29	j	80	27	5.1
5	1 de 1	1	1.29	j	50	327	0.8
6	1 de 1	1	1.43	j	90	75	0.9
7	1 de 1	1	1.63	j	90	215	1.5
8	1 de 1	1	1.68	j	90	215	2.3
9	1 de 1	1	1.78	j	75	265	3.9
10	1 de 1	1	1.78	j	67	17	5.8
11	1 de 1	1	2.06	j	90	270	9.8
12	1 de 1	1	2.06	F	58	39	10.3
13	1 de 1	1	2.96	j	78	10	11.5
14	1 de 1	1	3.26	j	36	140	3.5
15	1 de 1	1	3.35	j	70	282	2.8
16	1 de 1	1	3.4	j	85	313	6.7
17	1 de 1	1	3.62	j	85	77	5.3
18	1 de 1	1	3.8	j	85	257	7.5
19	1 de 1	1	3.93	j	84	275	6.4
20	1 de 1	1	4.05	j	90	315	4.6
21	1 de 1	1	4.74	j	90	3	8.4
22	1 de 1	1	4.74	j	85	78	3.5
23	1 de 1	1	4.89	j	90	255	6.7
24	1 de 1	1	4.94	j	30	187	7.4
25	1 de 1	1	5.06	j	78	259	6.7
26	1 de 1	1	5.16	j	77	53	3
27	1 de 1	1	5.27	j	85	257	4.1
28	1 de 1	1	5.37	j	88	23	3.8
29	1 de 1	1	5.37	j	70	320	8.2
30	1 de 1	1	5.48	j	46	32	3.5

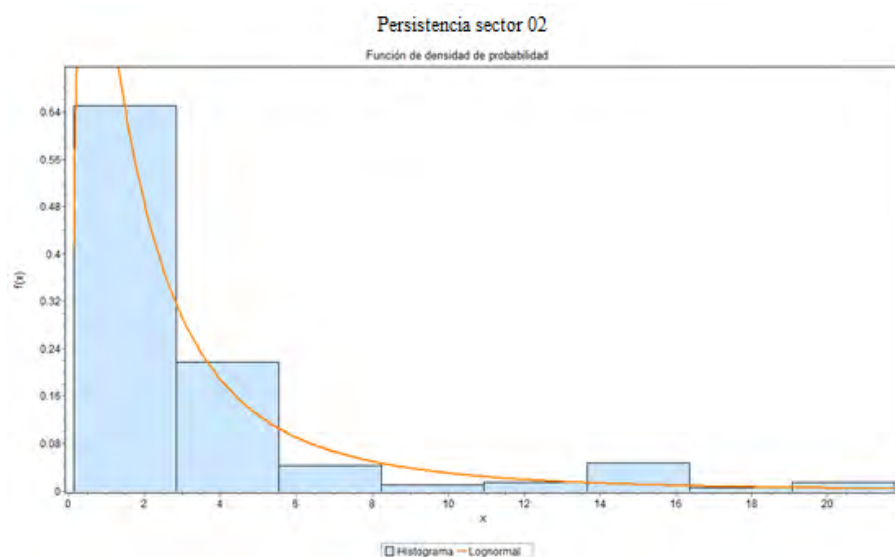
SECTOR 1

**Bondad de ajuste - Resumen**

#	<u>Distribución</u>	<u>Kolmogorov Smirnov</u>		<u>Anderson Darling</u>		<u>Chi-cuadrado</u>	
		Estadística	Rango	Estadística	Rango	Estadística	Rango
3	Burr (4P)	0.07	1	1.7	8	52.0	11
46	Pearson 6 (4P)	0.07	2	1.7	11	52.0	12
8	Dagum (4P)	0.07	3	1.6	2	54.0	18
2	Burr	0.07	4	1.7	4	44.0	4
36	Log-Pearson 3	0.07	5	1.7	10	51.0	8
38	Lognormal	0.07	6	1.7	9	53.0	15
45	Pearson 6	0.07	7	1.7	6	53.0	17
34	Log-Logistic	0.07	8	1.7	5	40.0	2
39	Lognormal (3P)	0.07	9	1.7	7	53.0	16

#	Distribución	Parámetros
1	Beta	$a_1=0.49$ $a_2=2.5$ $a=0.11$ $b=25.0$
36	Log-Pearson 3	$a=1.3E+4$ $b=-0.01$ $g=1.2E+2$
37	Logistic	$s=2.1$ $m=3.5$
38	Lognormal	$s=1.0$ $m=0.75$
39	Lognormal (3P)	$s=1.0$ $m=0.73$ $g=0.02$

SECTOR 2

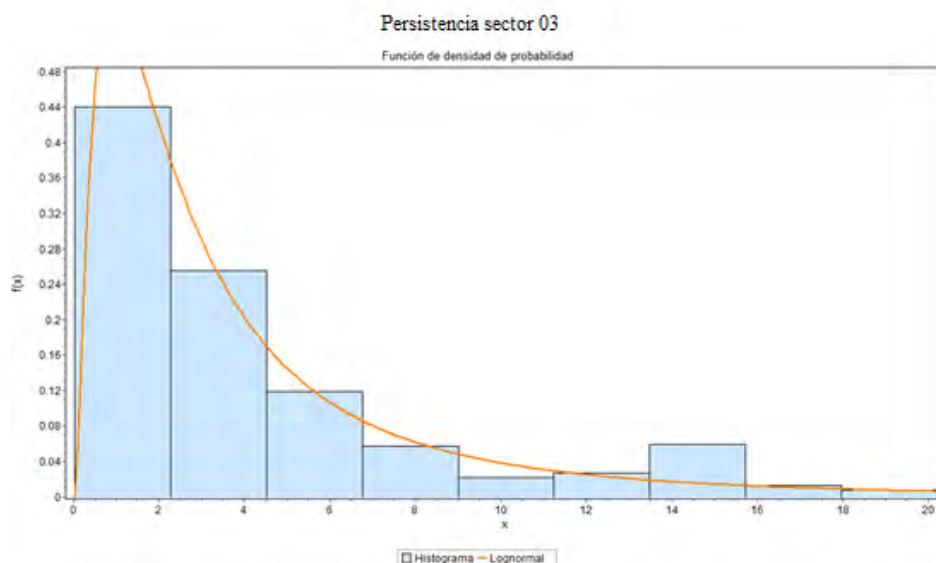


Bondad de ajuste - Resumen

#	Distribución	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-cuadrado	
		Estadíst	Rang	Estadístic	Rang	Estadíst	Rang
19	Gen. Extreme Value	0.06	1	1.3	17	5.7	8
36	Log-Pearson 3	0.07	14	0.58	3	4.1	4
38	Lognormal	0.07	15	0.59	4	4.1	5
42	Pareto 2	0.07	16	1.8	20	14.0	23

#	Distribución	Parámetros
1	Beta	$\alpha_1=0.37$ $\alpha_2=2.2$ $a=0.12$ $b=26.0$
34	Log-Logistic	$\alpha=1.6$ $\beta=1.8$
35	Log-Logistic (3P)	$\alpha=1.4$ $\beta=1.7$ $\gamma=0.1$
36	Log-Pearson 3	$\alpha=1.4E+5$ $\beta=0.0$ $\gamma=4.2E+2$
37	Logistic	$\sigma=2.2$ $\mu=3.2$
38	Lognormal	$\sigma=1.1$ $\mu=0.59$
39	Lognormal (3P)	$\sigma=1.2$ $\mu=0.53$ $\gamma=0.05$

SECTOR 3



Bondad de ajuste - Resumen

#	<u>Distribución</u>	<u>Kolmogorov Smirnov</u>		<u>Anderson Darling</u>		<u>Chi-cuadrado</u>	
		Estadística	Rango	Estadística	Rango	Estadística	Rango
1	Lognormal (3P)	0.06	1	1.1	1	14.0	1
2	Lognormal	0.07	2	1.1	2	17.0	5
3	Fatigue Life (3P)	0.06	3	1.1	3	18.0	7

#	Distribución	Parámetros
1	Beta	$\alpha_1=1.2$ $\alpha_2=2.4E+7$ $a=0.02$ $b=8.2E+7$
2	Burr	$k=1.8$ $\alpha=1.5$ $\beta=4.8$
39	Logistic	$\sigma=2.3$ $\mu=4.3$
40	Lognormal	$\sigma=1.0$ $\mu=0.98$
41	Lognormal (3P)	$\sigma=0.96$ $\mu=1.0$ $\gamma=-0.09$
42	Normal	$\sigma=4.2$ $\mu=4.3$
43	Pareto	$\alpha=0.2$ $\beta=0.02$

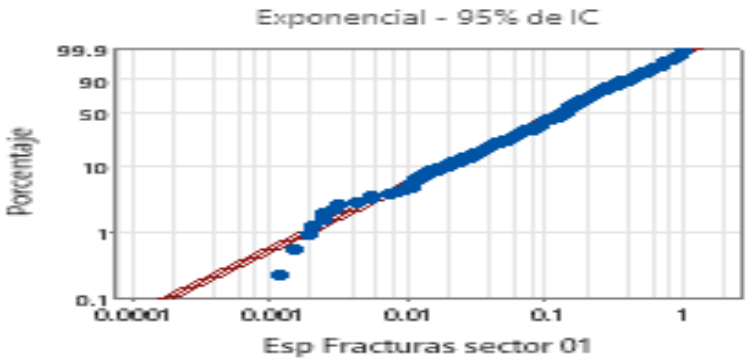
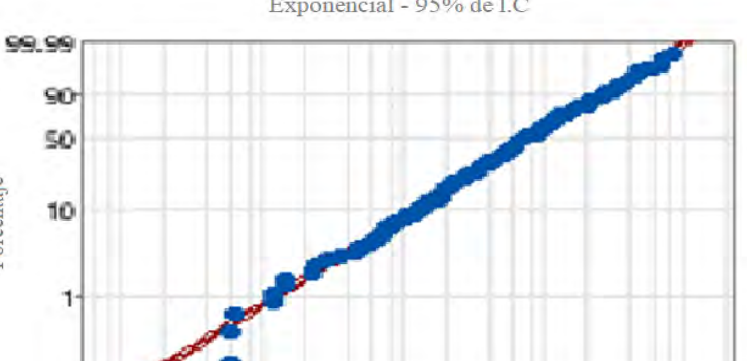
Anexo 5: Medios de verificación

Aplicación del software dips.

Aplicación del software dips.

Aplicación teórica para el cálculo del RQD

Anexo 6: Ajuste de distribución a distribución exponencial

 Exponencial - 95% de IC	Sector 01 La figura muestra el ajuste del espaciamiento entre discontinuidades medido en el Sector 01 a lo largo de la línea de detalle.
 Exponencial - 95% de IC	Sector 02 La figura presenta la distribución del espaciamiento entre fracturas en el Sector 02. Se observa el ajuste normalizado (frecuencia relativa) y la curva de ajuste teórico. El objetivo es evidenciar la variabilidad local del espaciamiento de las discontinuidades en este sector y validar que el patrón observado es consistente con una distribución de tipo exponencial.
 Exponencial - 95% de I.C	Sector 03 La figura muestra la distribución del espaciamiento entre fracturas en el Sector 03. Al igual que en los sectores anteriores, se grafica el ajuste con escala comparable y la curva de ajuste.

Anexo 7: Certificados de calibración de los equipos utilizados

- Cinta métrica



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
NTP-ISO/IEC 17025



HOMOLOGADO
Homologación Proveedores

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Cotización : 7000

SOLICITANTE : VILLAFUERTE TOLEDO, JIMMY OMAR

Dirección : URB. COVIDUC F 11 SAN SEBASTIAN - CUSCO - CUSCO

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : CINTA MÉTRICA

Marca : KAMASA

Modelo : KM-196

N° de serie : No indica

Alcance : 0 m a 50 m

Resolución : 1 mm

Tipo de indicación : Análogo

Clase : III

Código de identificación : ME-6069

Procedencia : China

Ubicación : No Indica

FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Fecha de calibración : 2025-10-18

Fecha de emisión : 2025-10-18

Lugar de calibración : Laboratorio de Longitud / METRINDUST S.A.C. - SEDE LOS JAZMINES

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó por el método de comparación directa, según el Procedimiento interno MT-015 "Procedimiento de calibración de cintas métricas y reglas rígidas". Primera edición, 2024 METRINDUST S.A.C.

AUTORIZADO POR:

N° DE CERTIFICADO

MT - 17310 - 2025

METRINDUST S.A.C. Departamento de Metrología realiza calibraciones y certificaciones en metrología según procedimientos de calibración validados o normalizados.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al cliente recalibrar sus instrumentos y equipos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

METRINDUST S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este equipo, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados. El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.





Dennis Rodríguez
Firma Digital
Gamarra Rodríguez Dennis
Gerente Técnico

PGC-16-r17/Setiembre 2024/Rev. 00

 www.metrindust.com.pe

 Av. del Aire 579 – 581 Urbanización Santa Catalina, La Victoria

 Informes@metrindust.com.pe

 (+51) 915 972 598
(+51) 925 033 922



EMPRESA
HOMOLOGADA

Certificado : MT - 17310 - 2025

CONDICIONES AMBIENTALES

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
Temperatura	20,1 °C	19,9 °C

TRAZABILIDAD

TRAZABILIDAD	PATRÓN DE TRABAJO	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Patrones de referencia de DM - INACAL	Cinta métrica patrón de 10 m	SECM-L-2025-297
Patrones de referencia de DM - INACAL	Retícula de Medición	LLA - 042 - 2025
Patrones de referencia de INACAL - DM	Regla patrón de 1 m	LLA - 020 - 2025

RESULTADOS DE MEDICIÓN

INDICACIÓN DEL PATRÓN	INDICACIÓN DEL INSTRUMENTO	ERROR DE INDICACIÓN	ERROR MÁXIMO PERMISIBLE Clase III (**)	INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN
mm	mm	mm	mm	mm
0,0	0,0	0,0	0,6	0,2
98,3	100,0	1,7	0,6	0,2
497,7	500,0	2,3	0,8	0,2
997,3	1 000,0	2,7	1,0	0,2
2996,8	3 000,0	3,2	1,8	0,2
4996,2	5 000,0	3,8	2,6	0,2
9995,2	10 000,0	4,8	4,6	0,3
14993,9	15 000,0	6,1	6,6	0,4
19993,7	20 000,0	6,3	8,6	0,5
24992,7	25 000,0	7,3	10,6	0,6
29991,5	30 000,0	8,5	12,6	0,7
34990,8	35 000,0	9,2	14,6	0,8
39989,5	40 000,0	10,5	16,6	0,9
44988,9	45 000,0	11,1	18,6	1,0
49988,0	50 000,0	12,0	20,6	1,2

Tensión aplicada = 20 N

OBSERVACIONES

(*) Según Recomendación Internacional N° 35 de la OIML, para cintas metálicas Clase III en servicio.

Se tomó como referencia el tope interior de la cinta métrica para la indicación de 0.

Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación (CALIBRADO).

INCERTIDUMBRE

La incertidumbre expandida reportada es la incertidumbre combinada multiplicada por el factor de cobertura ($k = 2$) de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %.

PGC-16-r17/Setiembre 2024/Rev. 00

** FIN DEL DOCUMENTO **

Página 2 de 2

- Distanciómetro digital



**LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
NTP-ISO/IEC 17025**



HOMOLOGADO
Homologación Proveedores

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Cotización : 7000

SOLICITANTE : VILLAFUERTE TOLEDO, JIMMY OMAR

Dirección : URB. COVIDUC F 11 SAN SEBASTIAN -
CUSCO - CUSCO

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : MEDIDOR DE DISTANCIA LÁSER

Marca : PREXISO
Modelo : P20M-3LI
N° de serie : No indica
Alcance de escala : 0,15 m a 20 m
Resolución : 0,001 m
Clase de láser : 2
Código de identificación : ME-2365
Procedencia : China
Ubicación : No indica

FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Fecha de calibración : 2025-10-18
Fecha de emisión : 2025-10-18
Lugar de calibración : Laboratorio de Longitud /
**METRINDUST S.A.C. - SEDE LOS
JAZMINES**

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Se realizó la calibración por comparación directa con un Medidor electrónico de distancia patrón.

AUTORIZADO POR:

N° DE CERTIFICADO

MT - 17311 - 2025

METRINDUST S.A.C. Departamento de Metrología realiza calibraciones y certificaciones en metrología según procedimientos de calibración validados o normalizados.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al cliente recalibrar sus instrumentos y equipos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

METRINDUST S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este equipo, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados. El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.



Dennis Rodríguez
FIRMA DIGITAL

Gamarra Rodríguez Dennis
Gerente Técnico

Página 1 de 3

www.metrindust.com.pe

Av. del Aire 579 - 581 Urbanización Santa Catalina, La Victoria

Informes@metrindust.com.pe

(+51) 915 972 598
(+51) 925 033 922



CONDICIONES AMBIENTALES

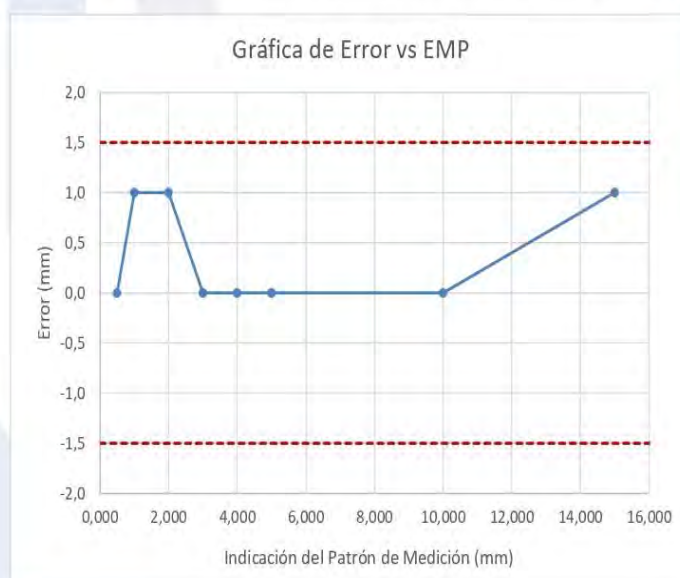
MAGNITUD	INICIAL	FINAL
Temperatura	19,1 °C	19,6 °C
Humedad relativa	62 %hr	61 %hr

TRAZABILIDAD

TRAZABILIDAD	PATRÓN DE TRABAJO	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Patrones de referencia de INACAL - DM	Medidor electrónico de distancia	LGD - 042 - 2025

RESULTADOS DE MEDICIÓN

INDICACIÓN DEL PATRÓN DE MEDICIÓN	INDICACIÓN PROMEDIO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	ERROR DE MEDICIÓN	INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN	ERROR MÁXIMO PERMITIDO
(m)	(m)	(mm)	(mm)	± (mm)
0,500	0,500	0,0	1,7	1,5
1,000	1,001	1,0	2,6	1,5
2,000	2,001	1,0	2,6	1,5
3,000	3,000	0,0	1,7	1,5
4,000	4,000	0,0	1,7	1,5
5,000	5,000	0,0	1,7	1,5
10,000	10,000	0,0	1,7	1,5
15,000	15,001	1,0	2,6	1,5





LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
NTP-ISO/IEC 17025



HOMOLOGADO
Homologación Proveedores

Certificado : MT - 17311 - 2025

OBSERVACIONES

Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación (CALIBRADO).
El error máximo permitido dado por el fabricante.

INCERTIDUMBRE

La incertidumbre expandida reportada es la incertidumbre combinada multiplicada por el factor de cobertura ($k = 2$) de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %.

**** FIN DEL DOCUMENTO ****

Página 3 de 3

 www.metrindust.com.pe

 Av. del Aire 579 - 581 Urbanización
Santa Catalina, La Victoria

 Informes@metrindust.com.pe

 (+51) 915 972 598
(+51) 925 033 922



EMPRESA
HOMOLOGADA

- Brújula



LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
NTP-ISO/IEC 17025



HOMOLOGADO
Homologación Proveedores

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Cotización : 7000

SOLICITANTE : VILLAFUERTE TOLEDO, JIMMY OMAR

Dirección : URB. COVIDUC F 11 SAN SEBASTIAN - CUSCO - CUSCO

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : BRÚJULA

Marca : No indica
Modelo : No indica
N° de serie : No indica
Alcance : 0 ° a 360 °
Resolución : 1,0 °
Tipo de indicación : Analógico
Código de identificación : MT-2410
Procedencia : No indica
Ubicación : No indica

FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Fecha de calibración : 2025-10-18
Fecha de emisión : 2025-10-18
Lugar de calibración : Laboratorio de Longitud /
METRINDUST S.A.C.- SEDE LOS JAZMINES

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó por comparación directa, según el ASTM F2417 – 04 – Métodos de prueba para brújulas magnéticas de mano. Cuarta Edición - 2017. ASTM International de Estados Unidos.

AUTORIZADO POR:



N° DE CERTIFICADO

MT - 17312 - 2025

METRINDUST S.A.C. Departamento de Metrología realiza calibraciones y certificaciones en metrología según procedimientos de calibración validados o normalizados.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al cliente recalibrar sus instrumentos y equipos a intervalos apropiados.

Los resultados son válidos solamente para el ítem sometido a calibración, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

METRINDUST S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este equipo, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados. El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.



Dennis Gamarra
FIRMA DIGITAL

Dennis Gamarra Rodríguez
Gerente Técnico

Página 1 de 2

www.metrindust.com.pe

Av. del Aire 579 – 581 Urbanización Santa Catalina, La Victoria

Informes@metrindust.com.pe

(+51) 915 972 598
(+51) 925 033 922





**LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
NTP-ISO/IEC 17025**



HOMOLOGADO
Homologación Proveedores

Certificado : MT - 17312 - 2025

CONDICIONES AMBIENTALES

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
Temperatura	20,6 °C	20,7 °C
Humedad relativa	57 %hr	56 %hr

TRAZABILIDAD

TRAZABILIDAD	PATRÓN DE TRABAJO	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Patrones de referencia de METRINDUST S.A.C.	Medidor de campo electromagnético	MT - 5123 - 2024
Patrones de referencia de INACAL-DM	Bloques angulares	LLA-184-2025

RESULTADOS DE MEDICIÓN

ÁNGULO DE INCLINACIÓN

INDICACIÓN DEL PATRON	INDICACIÓN DEL EQUIPO	ERROR	INCERTIDUMBRE
15,2	15,0 °	-0,2 °	0,8 °
30,3	31,0 °	0,7 °	0,5 °
45,5	45,0 °	-0,5 °	0,9 °
50,0	50,0 °	0,0 °	0,8 °
60,7	60,0 °	-0,7 °	0,8 °
75,8	76,0 °	0,2 °	0,8 °
90,0	90,0 °	0,0 °	0,8 °

TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN (Segundos)
15,16

SENSIBILIDAD A VARIACIONES DE CAMPO MAGNÉTICO (μT)	RESULTADO
2	Conforme
4	Conforme
6	Conforme

OBSERVACIONES

Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación (CALIBRADO).

INCERTIDUMBRE

La incertidumbre expandida reportada es la incertidumbre combinada multiplicada por el factor de cobertura (k = 2) de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %.

**** FIN DE DOCUMENTO ****

Página 2 de 2

www.metrindust.com.pe

Av. del Aire 579 – 581 Urbanización
Santa Catalina, La Victoria

Informes@metrindust.com.pe

(+51) 915 972 598
(+51) 925 033 922



**EMPRESA
HOMOLOGADA**

Anexo 8: Informe técnico, caracterización estructural (fracturas) de macizo rocoso en talud vial

Se conto con la colaboración y asesoría del especialista francés Oliver Sánchez el que fue recomendado por Antoine Rabatel experto glaciólogo francés; el especialista llego como apoyo a un estudio de glaciología desarrollado por la escuela de Ingeniería Geológica.

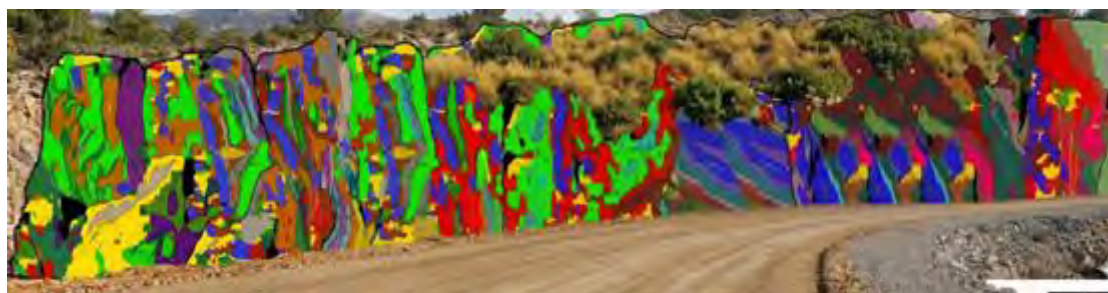
Fecha: 11 de junio de 2022

Ubicación: Tramo Curvo Estación 11+500

1. Análisis de Distribución Espacial

La Figura 1 presenta la segmentación cromática del talud (50m x 13m) proyectada sobre la vía con superficie de rodadura en material granular. Cada color representa una familia de orientaciones identificada mediante algoritmos de agrupamiento (*clustering*).

Figura 79: Modelo digital, mapa de Cluster y Orientaciones en el Talud de Carretera tramo 11+500 carretera San Jeronimo-Paruro



Datos de Orientación y Clasificación de Sets

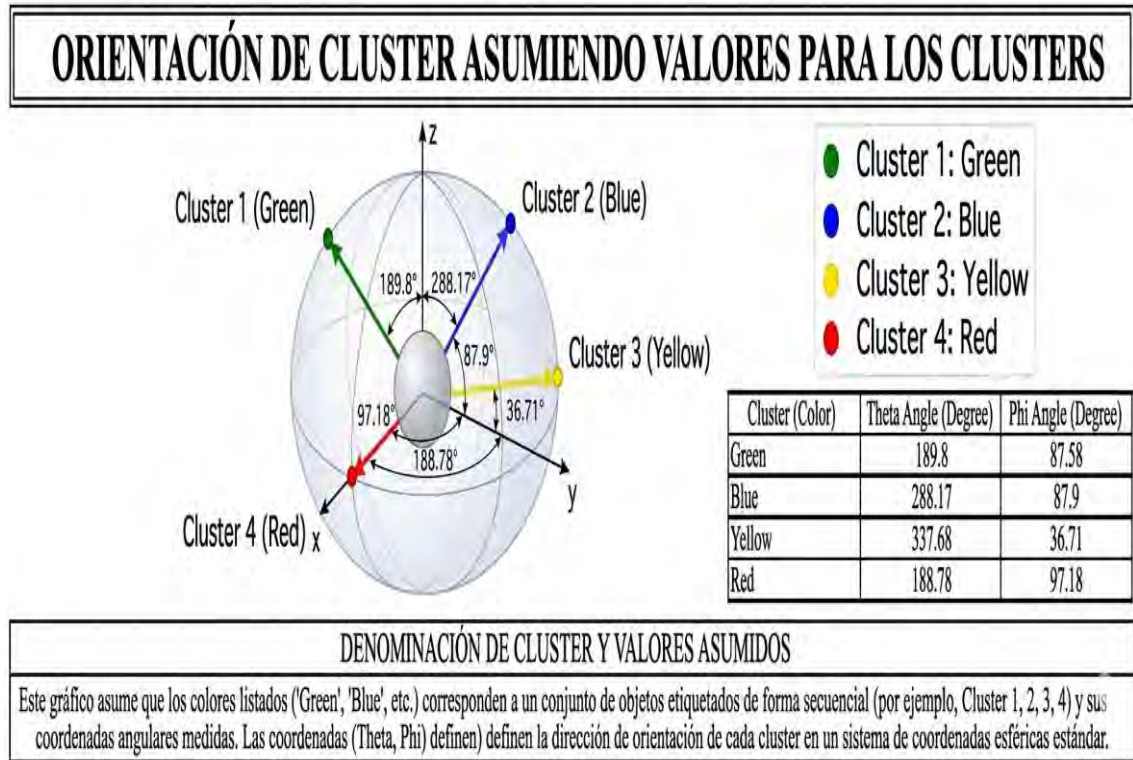
Tabla 37.
Datos Consolidados

Cluster (Color)	Theta (°)	Phi (°)	Ángulo Medio de Traza (°)
Rojo	188.78	97.18	56.97
Verde	189.80	87.58	165.66
Azul	288.17	87.90	80.56
Amarillo	337.68	36.71	10.26
Cian	---	---	72.27
Magenta	---	---	89.00

Análisis de Orientación Angular (Esfera de Referencia)

Este gráfico visualiza la dirección de los vectores de cada cluster en un sistema de coordenadas esféricas estándar.

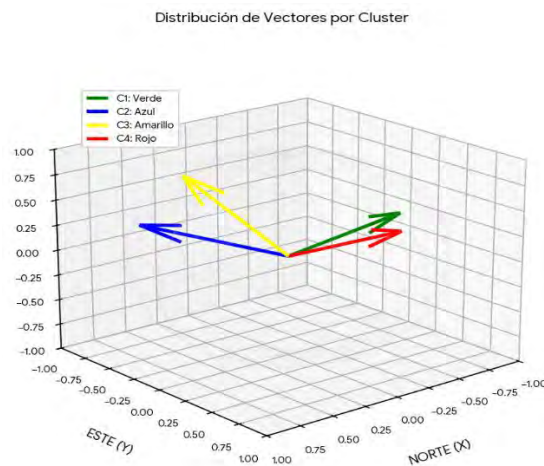
Figura 80.
Análisis de Orientación Angular



Análisis Vectorial Geográfico

Referencia: Proyección de Cluster en ejes cartesianos (X=Norte, Y=Este).

Figura 81.
Análisis Vectorial Geográfico



Datos de Orientación y Clasificación de Sets Principales**Tabla38***Parámetros de Orientación media de los Clusters Principales*

Cluster (Color)	Theta (°)	Phi (°)	Clasificación del Set
Verde	189.80	87.58	Alta densidad en la sección central Set Longitudinal Principal
Azul	288.17	87.90	Orientación predominante hacia el eje Y negativo Set de Cizalla Lateral
Amarillo	337.68	36.71	Inclinación moderada, mayor elevación (Phi bajo). Set de Sub-corrimiento
Rojo	188.78	97.18	Orientación opuesta al eje X Set Transversal Crítico

Nota. Los ángulos Theta y Phi definen la dirección del vector normal a la estructura.

Tabla39*Denominación y Rango de Similitud Estructural*

Set de Fractura	Ángulo Medio Traza (°)	Tolerancia (+/- 5°)	Denominación Geomecánica
Set A (Rojo)	56.97	Cumple	Fracturamiento Oblicuo
Set B (Verde)	165.66	Cumple	Foliación Sub- paralela

Set C (Azul)	80.56	Cumple	Diaclasado Vertical
Set D (Amarillo)	10.26	Cumple	Estratificación de Techo

Nota. El criterio de similitud de en rumbo y buzamiento garantiza la coherencia estadística de cada set identificado.

Conclusiones Preliminares

El análisis visual y tabular confirma la presencia de cuatro familias principales de discontinuidades. La dispersión de los clusters en el sector central del talud sugiere una zona

de mayor fracturamiento y presenta pixelado por paralelismo y mucha proximidad de las fracturas que se traslapan, requiere monitoreo directo insitu. (scan Line)

El equipo empleado para realizar el trabajo es un scanner laser tipo LiDAR de la marca OPTECH modelo ILRIS-LR

Tabla 40
Especificaciones técnicas

Parameter	ILRIS-3D	ILRIS-3D-ER	ILRIS-HD	ILRIS-HD-ER	ILRIS-LR
Range 80% reflectivity	1200 m	1700 m	1250 m	1800 m	3000 m
Range 10% reflectivity	400 m	650 m	400 m	650 m	1330 m
Minimum range	3 m				
Laser repetition rate (peak and effective PRF) ¹	2500 to 3500 Hz		10,000 Hz		10,000 Hz
Efficiency (effective PRF/peak PRF)	100%				
Raw range accuracy ^{2,3}	7 mm @ 100 m				
Raw range accuracy (averaged) ^{3,4}	n/a		4 mm @ 100 m		4 mm @ 100 m
Raw angular accuracy	8 mm @ 100 m (80 μrad)				
Scanner Performance					
Field of view	40° x 40° (-20° through 90°, -90° through 20° with 3,D option)				
Minimum step size ³	0.001146° (20 μrad)		0.000745° (13 μrad)		0.001146° (20 μrad)
Maximum density (point-to-point spacing)	2 cm @ 1000 m		1.3 cm @ 1000 m		2 cm @ 1000 m
Rotational speed ¹	0.001 to 20°/sec				
Rotational step size (minimum)	0.001146° (20 μrad)				
Beam diameter (1/e ²)	22 mm @ 100 m		19 mm @ 100 m		27 mm @ 100 m
Beam divergence	0.009740° (170 μrad)		0.008594° (150 μrad)		0.014324° (250 μrad)
Laser wavelength	1535 nm		1535 nm		1064 nm
Laser class ^{5,7}	1 or 1M		1 or 1M		3
Integrated camera	3.1 MP				

Especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante para el escáner LIDAR OPTECH modelo ILRIS-LR.

Anexo 9: Validación técnico-académica del modelamiento geomecánico (%RQD) por detail line

Validación del ANÁLISIS DE LA DESIGNACIÓN DE CALIDAD DE ROCA EN LA CARRETERA SAN JERONIMO -PARURO KM.12,2022 (Prog. 0+000 a 0+149.5)

Variable Analizada: Rock Quality Designation (RQD)

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Se expone la validación estadística y geoestructural del Índice de Calidad de la Roca (RQD) estimado a lo largo de un sector del talud carretero con una longitud total expuesta de 149.5 m. El objetivo fundamental es contrastar analíticamente los valores de RQD estimados mediante interpolación espacial directa, (utilizando un muestreo estratificado); frente a los valores teóricos deducidos a partir de la densidad lineal de fracturas (λ), aplicando el modelo probabilístico de Priest & Hudson. Esta confrontación matemática permite cuantificar el nivel de incertidumbre del modelo geomecánico y certificar su idoneidad de sus valores para el diseño ingenieril final.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA

2.1. Relación Teórica entre Densidad de Fracturas y RQD

Cuando las distancias entre discontinuidades en un testigo o celda de mapeo siguen una distribución exponencial, el RQD teórico se calcula mediante el enfoque probabilístico desarrollado por Priest & Hudson (1976, 1981):

$$RQD_{teo} = 100 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot (1 + \lambda \cdot t)$$

Donde:

- λ : Densidad teórica de fracturas (frecuencia lineal por metro, ff/m).
- t : Umbral de corte estándar ($t = 0.1$ m), representativo de la longitud mínima de fragmentos sanos estipulada en la norma original.

2.2. Métricas de Error y Desviación Analítica

Para calibrar la precisión local y global del modelo interpolado respecto a los puntos de control, se emplean las siguientes expresiones matemáticas:

- **Error Absoluto (E_{abs}):** Mide la discrepancia lineal cuantitativa:

$$E_{abs} = |RQD_{est} - RQD_{teo}|$$

- **Error Porcentual Relativo ($\%E$):** Escala el error respecto al valor analítico base:

$$\%E = \left| \frac{RQD_{teo} - RQD_{est}}{RQD_{teo}} \right| \times 100$$

- **Error Promedio Global ($\bar{E}_{global}$):** Media aritmética de las desviaciones porcentuales relativas evaluadas en los N puntos de control ($N = 3$):

$$\bar{E}_{global} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \%E_i$$

2.3. Funciones de Confiabilidad

La confiabilidad representa la probabilidad de certeza del modelo estimado en cada sector geomecánico y globalmente:

- **Confiabilidad por Tramo (C_{pt}):**

$$C_{pt} = 100\% - \%E$$

- **Confiabilidad Global (C_{global}):**

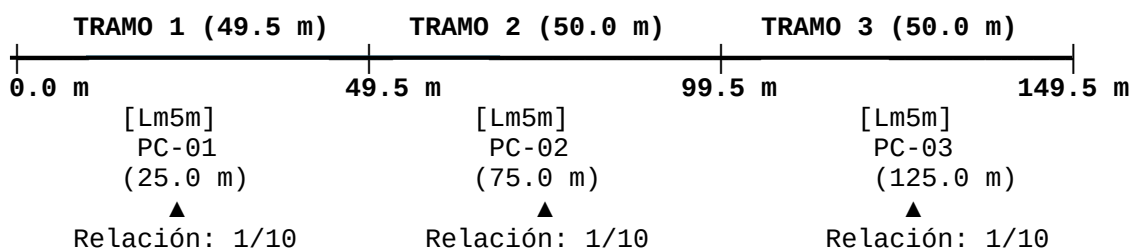
$$C_{global} = 100\% - \bar{E}_{global}$$

3. ESQUEMA TEMPORAL Y DISEÑO GEOMÉTRICO DEL MUESTREO

La campaña de campo dividió el talud carretero de 149.5 m en tres sectores homogéneos de control. En cada uno de ellos se configuró un Punto de Control (PC) geométricamente centrado, abstrayendo una longitud física de muestreo lineal constante ($L_m = 5$ m).

Esquema Espacial de Estaciones de Control

ESCALA HORIZONTAL: 1/1000 (Aproximada)



3.1. Justificación Técnica de la Longitud de Muestreo ($L_m = 5$ m)

A. Criterio Estadístico (Teorema del Límite Central)

De acuerdo con Cochran (1977), para estimar parámetros medios con una variabilidad geomorfológica moderada (Coeficiente de Variación $CV \approx 30\% - 50\%$), la longitud requerida de muestra ponderada (n) se rige por:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E_{adm}} \right)^2$$

Asumiendo un nivel de confianza del 95% ($Z_{\alpha/2} = 1.96$), una desviación estándar teórica de la variabilidad del macizo $\sigma = 15\%$ y un error admisible en ingeniería geotécnica del $E_{adm} = 10\%$:

$$n = \left(\frac{1.96 \cdot 15}{10} \right)^2 \approx 8.64 \text{ m}$$

Al fijar operativamente $L_m = 5$ m por restricciones físicas del frente de excavación, el error absoluto real despejado resulta en:

$$E = \frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{\sqrt{L_m}} = \frac{1.96 \cdot 15}{\sqrt{5}} \approx 13.15\%$$

Este valor remite al rango estrictamente **Aceptable** (10% – 15%) bajo estándares internacionales de validación macro-estructural.

B. Criterio Geoestadístico y Normativo

- **Longitud de Correlación (Rango):** En la mecánica de rocas (Journel & Huijbregts, 1978), los rangos típicos del variograma lineal para

densidades de fracturas oscilan entre 10 my 30 m. Al fijar $L_m = 5$ m, el soporte físico es inferior al radio de correlación geológica, previniendo el efecto de "sobre-suavizado" y permitiendo capturar variabilidades locales significativas.

- **Alineación Normativa:** La ventana lineal de 5 mse fundamenta firmemente en la normativa **ASTM D6032** y las directrices de la **ISRM (International Society for Rock Mechanics)**, las cuales recomiendan testigos o celdas de corrida entre 5 m y 10 m para garantizar significancia en macizos rocosos altamente discontinuos.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO Y RESULTADOS DE VALIDACIÓN

A partir de los datos brutos extraídos del relevamiento geomecánico y los algoritmos procesados en matriz, se consolidan las siguientes tablas analíticas:

Cuadro 3: Comparativa Lineal de Ajuste de Errores (Datos de Control)

Estación (PC)	Ubicación (m)	λ Teórico (ff/m)	RQD Teórico (%)	RQD Estimado (%)	Error Absoluto	Error Porcentual (%)	Condición de Aceptabilidad
PC-01	25.0	12.40	64.70	65.00	0.30	0.464%	✓ ACEPTABLE
PC-02	75.0	9.65	74.80	78.00	3.20	4.278%	✓ ACEPTABLE
PC-03	125.0	17.40	48.00	46.00	2.00	4.167%	✓ ACEPTABLE

Cuadro 4: Análisis de Confiabilidad Rigurosa por Tramo Estructural

Nota: Evaluación analítica directa contra la solución exacta de la función continua de Priest & Hudson.

Sector Homogéneo	Longitud (m)	Estación Media	RQD Teórico Analítico (%)	RQD Estimado (%)	Error Porcentual Relativo	Confiabilidad Porcentual	Calificación Técnica
Tramo 1	49.5	25.0 m	64.8220%	65.00	0.274%	99.726%	Alta confianza
Tramo 2	50.0	75.0 m	74.8632%	78.00	4.190%	95.810%	Alta confianza

Sector Homogéneo	Longitud (m)	Estación Media	RQD Teórico Analítico (%)	RQD Estimado (%)	Error Porcentual Relativo	Confiabilidad Porcentual	Calificación Técnica
Tramo 3	50.0	125.0 m	48.0926%	46.00	4.351%	95.649%	Alta confianza

Cuadro 5: Indicadores Estadísticos Agregados del Modelo

Error Promedio Global (E_{global})	: 2.93857% $\approx$ 2.94%
Confiabilidad Global del Sistema (C_{global})	: 97.06143% $\approx$ 97.06%
Desviación Estándar de los Errores	: 2.17080%
Tasa de Éxito Validación Numérica	: 100%(3/3 puntos aprobados)

5. CRITERIOS DE CALIDAD

Para dictaminar la validez del modelo, los resultados matemáticos se contrastan con los umbrales de control de calidad exigidos por la disciplina geotécnica (derivados de los estándares ISRM 2007, Deutsch & Journal 1998, y Hoek & Brown 1997):

[0.46% - 4.35% Error Detectado]

▼
 |= EXCELENTE |= MUY BUENO |= ACEPTABLE |= MARGINAL |= INACEPTABLE |=
 0% 5% 10% 15% 20% >20%

- **Rango Excelente ($\leq 5\%$):** Se asume que el error está dentro del ruido instrumental normal de los sistemas de medición geomecánica. Los tres puntos evaluados presentan errores porcentuales individuales inferiores a este límite estricto (0.27%, 4.19%, y 4.35%).
- **Comportamiento de la Variación Espacial:** La baja desviación estándar de los errores (2.17%) revela un **patrón espacialmente estable**. Esto significa que el algoritmo de interpolación geoestadística no introduce sesgos ni deformaciones geométricas a lo largo del eje del talud, respondiendo de forma armónica tanto en zonas de calidad media (**Tramo 1 y 2**, Calificación III) como en zonas degradadas o de fracturamiento crítico (**Tramo 3**, Calificación II, RQD teórico de 48.09%).

Validación de Valores %RQD

CUADRO 1: DATOS BASE Y CÁLCULOS TEÓRICOS

PARÁMETRO	Valor	Unidad	Observaciones
Longitud total muestreada	149.5	m	Detail line completa
Tramo 1	49.5	m	49.5 m desde origen
Tramo 2	50	m	50 m desde origen
Tramo 3	50	m	125 m desde origen
Punto control Tramo 1	25	m	Punto medio del tramo
Punto control Tramo 2	75	m	Punto medio del tramo
Punto control Tramo 3	125	m	Punto medio del tramo
Umbral estándar (t) 0.1	m		Para ecuación Priest & Hudson
Longitud muestra 5	m		En el eje del PC

CUADRO 2: VALORES TEÓRICOS EN PUNTOS DE CONTROL

Punto Control	Distancia (m)	λ Teórico (ff/m)	RQD Teórico (%)	Calidad de roca	Calificación
PC-01	25	12.4	64.82206482	Media	III
PC-02	75	9.65	74.86319875	Media	III
PC-03	125	17.4	48.09258977	Mala	II

CUADRO 3: VALIDACIÓN - COMPARATIVA TEÓRICO vs ESTIMADO

Punto	Distancia (m)	λ Teórico (ff/m)	RQD Teórico (%)	RQD Estimado (%)	Error Absoluto	Error Porcentual	Validación
PC-01	25	12.4	64.7	65	0.3	0.463678516	✓ ACCEPTABLE
PC-02	75	9.65	74.8	78	3.2	4.278074866	✓ ACCEPTABLE
PC-03	125	17.4	48	46	2	4.166666667	✓ ACCEPTABLE

RESUMEN ESTADÍSTICO:

Error promedio	2.96947335
----------------	------------

Error máximo	4.278074866
Error mínimo	0.463678516
Desviación estándar errores	2.170796802
Puntos aceptables	3
% Validación exitosa	100

CUADRO 4: ANÁLISIS DE CONFIANZA POR TRAMO

Tramo	Longitud (m)	Punto Control	λ Teórico (ff/m)	RQD Teórico (%)	RQD Estimado (%)	Error %	Confiabilidad
Observaciones							
Tramo 1	49.5	25 m	12.4	64.82206482	65	0.274497861	99.72550214 Alta confianza
Tramo 2	50	75 m	9.65	74.86319875	78	4.190044379	95.80995562 Alta confianza
Tramo 3	50	125 m	17.4	48.09258977	46	4.351168816	95.64883118 Alta confianza

CUADRO 5: INFORME FINAL DE VALIDACIÓN

PARÁMETRO DE VALIDACIÓN	VALOR	INTERPRETACIÓN	RECOMENDACIÓN
Error promedio global	2.93857035233867%	buena	Isovalores aceptables para diseño
Puntos validados exitosamente	"3/3"	Validación completa	proceder análisis
Confiabilidad global	97.0614296476613%	Muy alta	Mapas confiables para diseño final
Variación espacial detectada	Patrón estable	Análisis de tendencia	Calidad uniforme en talud

CUADRO 6: CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD

Nivel de Error	Rango	Clasificación	Acción Recomendada
Excelente	$\leq 5\%$	✓✓ Validación Óptima	Isovalores altamente confiables
Muy Bueno	5% - 10%	✓ Validación Exitosa	Aceptar para todos los propósitos
Aceptable	10% - 15%	○ Validación Aceptable	Aceptar para diseño ingenieril
Marginal	15% - 20%	⚠ Revisión Sugerida	Verificar interpolación
Inaceptable	> 20%	✗ Revisión Requerida	Recalcular isovalores

Validación de Valores %RQD

CUADRO 1: DATOS BASE Y CÁLCULOS TEÓRICOS

PARÁMETRO	Valor	Unidad	Observaciones
Longitud total muestreada	149.5	m	Detail line completa
Tramo 1	49.5	m	49.5 m desde origen
Tramo 2	50	m	50 m desde origen
Tramo 3	50	m	125 m desde origen
Punto control Tramo 1	25	m	Punto medio del tramo
Punto control Tramo 2	75	m	Punto medio del tramo
Punto control Tramo 3	125	m	Punto medio del tramo
Umbral estándar (t) 0.1	m		Para ecuación Priest & Hudson
Longitud muestra	5	m	En el eje del PC

CUADRO 2: VALORES TEÓRICOS EN PUNTOS DE CONTROL

Punto	Control	Distancia (m)	λ Teórico (ff/m)	RQD Teórico (%)	Calidad de roca	Calificación
PC-01		25	12.4	64.82206482	Media	III
PC-02		75	9.65	74.86319875	Media	III
PC-03		125	17.4	48.09258977	Mala	II

CUADRO 3: VALIDACIÓN - COMPARATIVA TEÓRICO vs ESTIMADO

Punto	Distancia (m)	λ Teórico (ff/m)	RQD Teórico (%)	RQD Estimado (%)	Error Absoluto	Error Porcentual	Validación
PC-01	25	12.4	64.7	65	0.3	0.463678516	✓ ACEPTABLE
PC-02	75	9.65	74.8	78	3.2	4.278074866	✓ ACEPTABLE
PC-03	125	17.4	48	46	2	4.166666667	✓ ACEPTABLE

RESUMEN ESTADÍSTICO:

Error promedio	2.96947335
Error máximo	4.278074866
Error mínimo	0.463678516
Desviación estándar errores	2.170796802
Puntos aceptables	3
% Validación exitosa	100

CUADRO 4: ANÁLISIS DE CONFIANZA POR TRAMO

Tramo	Longitud (m)	Punto Control	λ Teórico (ff/m)	RQD Teórico (%)	RQD Estimado (%)	Error	%Confiabilidad	Observaciones
Tramo 1	49.5	25 m	12.4	64.82206482	65	0.274497	99.7255	Alta confianza
Tramo 2	50	75 m	9.65	74.86319875	78	4.190044	95.8099	Alta confianza
Tramo 3	50	125 m	17.4	48.09258977	44	4.351168	95.6488	Alta confianza

CUADRO 5: INFORME FINAL DE VALIDACIÓN

PARÁMETRO DE VALIDACIÓN	VALOR	INTERPRETACIÓN	RECOMENDACIÓN
Error promedio global	2.93857035233867%	buena	Isovalores aceptables para diseño
Puntos validados exitosamente	"3/3"	Validación completa	proceder analisis
Confiabilidad global	97.0614296476613%	Muy alta	Mapas confiables para diseño final
Variación espacial detectada	Patrón estable	Análisis de tendencia	Calidad uniforme en talud

CUADRO 6: CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD

Nivel de Error	Rango	Clasificación	Acción Recomendada
Excelente	$\leq 5\%$	✓✓ Validación Óptima	Isovalores altamente confiables
Muy Bueno	5% - 10%	✓ Validación Exitosa	Aceptar para todos los propósitos
Aceptable	10% - 15%	○ Validación Aceptable	Aceptar para diseño ingenieril
Marginal	15% - 20%	△ Revisión Sugerida	Verificar interpolación
Inaceptable	$> 20\%$	X Revisión Requerida	Recalcular isovalores

6. CONCLUSIONES.

- **Conclusión 1:** El modelo de interpolación lineal, para la variable %RQD refleja de manera matemática fidedigna las condiciones de fracturamiento del macizo rocoso, alcanzando un índice de **Confiabilidad Global del 97.06%**.
- **Conclusión 2:** De acuerdo con la clasificación geotécnica estandarizada, la totalidad del talud se encuadra bajo un nivel de **Validación Óptima (Nivel Excelente)**. Ello implica que las discrepancias observadas no comprometen los cálculos ingenieriles posteriores.