



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

**Evaluación de fragmentación y formación de bloques alrededor de túnel, basada en intensidad de fracturas y anisotropía direccional desde datos de sondaje.**

Álvaro Opazo Alvear

Memoria para optar al título de Ingeniero civil de minas

Profesor Guía: PhD. Amin Hekmatnejad

Profesor Co-Guía: PhD. Manuel Reyes

Universidad de Talca, Chile

CURICÓ, CHILE

2019

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## Índice

Índice .....	2
Resumen .....	10
Abstract .....	11
Agradecimientos .....	12
Capítulo 1: Introducción.....	13
1.1 Motivación.....	13
1.2 Descripción del problema.....	14
1.3 Solución propuesta .....	14
1.4 Objetivos .....	15
1.5 Alcances del proyecto .....	15
1.6 Metodologías y herramientas utilizadas .....	16
1.7 Resultados esperados .....	17
1.8 Organización de la memoria escrita.....	18
Capítulo 2 Marco teórico “Revisión bibliográfica y estado del arte” .....	19
2.1 Discontinuidades.....	19
2.2 Origen de las discontinuidades .....	20
2.3 Fallas .....	21
2.4 Estratificación.....	21
2.5 Discrete Fracture Network (DFN).....	22
2.6 Intensidad de fracturas.....	24
2.7 Medidas de intensidad de Fracturas .....	25
2.8 Tamaño de fracturas .....	25
2.9 Forma de fracturas.....	26

2.10 Orientación de las fracturas .....	26
2.11 Distribución espacial de las fracturas.....	27
2.12 Distribuciones de probabilidad y sus aplicaciones .....	27
2.12.1 Distribución normal.....	27
2.12.2 Distribución Lognormal .....	28
2.12.3 Distribución Fisher.....	28
2.13 Teoría de Bloques.....	29
2.13.1 Bloque crítico (“Key block”).....	30
2.13.2 Ecuaciones claves.....	31
2.13.3 Volumen de un bloque poliédrico de “n” caras. ....	34
2.14 Análisis de cuñas en Fracman .....	41
2.15 Cálculo de la Variable propuesta Circular Variance “C.V.”.....	43
2.16 Terzaghi’s Rock Mass Classification.....	44
2.17 Rock quality designation (RQD) .....	46
2.18 Rock Structure Rating (RSR) .....	47
2.19 Clasificación Geomecánica (RMR) .....	51
2.20 Clasificación Q de Barton para macizos rocosos.....	53
2.21 Clasificación RMi para macizos rocosos.....	55
Capítulo 3 Metodología, Simulación de redes de fracturas y mapeo.....	57
3.1 Simulación de la orientación en el modelo estocástico .....	58
3.2 Simulación del tamaño en el modelo estocástico .....	62
3.3 Simulación de la intensidad en el modelo. ....	63
3.4 Logging simulado .....	63
3.5 Modelo experimental final.....	66
Capítulo 4 Resultados experimentales y parámetros calculados .....	68

4.1 Resultados del modelo experimental .....	68
4.2 Resultados de mapeo o Logging y su efecto en Circular Variance “C.V.”....	72
4.3 Resultados del método propuesto.....	73
4.4 Precauciones en el cálculo de “C.V.” .....	80
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones. ....	83
5.1 Conclusiones.....	83
5.2 Recomendaciones .....	84
Capítulo 6 Bibliografía .....	87
Anexos.....	93
Anexo A. ....	93
Anexo B .....	108
Anexo C .....	119
Anexo D .....	120
Anexo E .....	127
Anexo F.....	128
Anexo G .....	129

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Redes de fracturas en Fracman cada color representa pertenencia a un joint set. ....	16
Ilustración 2 Cuñas generadas para las redes de fracturas simuladas. ....	16
Ilustración 3 Esquema explicativo de Trend y Plunge. ....	20
Ilustración 4 Representación de ideal de un DFN en una excavación ficticia con forma de herradura, Los colores indican Área de fracturas.....	22
Ilustración 5 Medidas de intensidad en una y dos dimensiones .....	24
Ilustración 6 Esquema de acueducto Romano. ....	30
Ilustración 7 Bloques críticos en el arco de una excavación.....	31

Ilustración 8 Esquema descriptivo de la ecuación de un plano. ....	33
Ilustración 9 Vértices reales de un polígono dado. ....	37
Ilustración 10 Subdivisión de un polígono en triángulos. ....	39
Ilustración 11 Subdivisión de poliedros en tetraedros. ....	40
Ilustración 12 Deslizamiento en un plano. ....	41
Ilustración 13 Deslizamiento en dos planos. ....	42
Ilustración 14 Procedimiento para el cálculo del RQD. ....	46
Ilustración 15 Selección de fortificación. ....	50
Ilustración 16 Diseño de Regiones en Fracman ....	57
Ilustración 17 Simulación de excavaciones. ....	58
Ilustración 18 Representación en red estereográfica de los sets estructurales. ....	59
Ilustración 19 Red estereográfica primera simulación. ....	60
Ilustración 20 Esquema explicativo de las realizaciones direccionales para el estudio ....	61
Ilustración 21 DFN en una región cuyo P32 es 1 y su tamaño en base a distribución log normal de media 4. ....	62
Ilustración 22 Simulación de DFNs generados en base a un set estructural variando el valor de P32. ....	63
Ilustración 23 Disposición de scanlines en una excavación simulada ....	64
Ilustración 24 Simulación DFN en una región de 10x10x8m con 5 sets estructurales. ....	65
Ilustración 25 Esquema explicativo, Logging de fracturas. ....	66
Ilustración 26 Primera simulación del modelo experimental. ....	67
Ilustración 27 Registro de fracturas con scanlines en X, Y & Z del modelo simulado. ....	67
Ilustración 28 Primeros 7 registros de fracturas con scanlines en X, Y & Z. ....	67
Ilustración 29 Efecto del número de sets en la fragmentación ....	68
Ilustración 30 Efecto de la intensidad de fracturas en la fragmentación. ....	69
Ilustración 31 Análisis de Cuñas. ....	70
Ilustración 32 Efecto del número de sets en la formación de cuñas ....	70
Ilustración 33 Efecto de la intensidad de fracturas en la formación de cuñas ....	71

Ilustración 34 Efectos de la dirección de mapeo en el número de fracturas.....	72
Ilustración 35 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.....	74
Ilustración 36 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio. ....	75
Ilustración 37 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.....	75
Ilustración 38 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.....	76
Ilustración 39 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio. ....	77
Ilustración 40 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.....	77
Ilustración 44 Circular Variance vs Cuñas, variando P32.....	81
Ilustración 45 Circular Variance vs Volumen medio, variando P32 .....	81
Ilustración 46 Circular Variance vs Número de bloques, variando P32. ....	82
Ilustración 47 Red estereográfica región 1. ....	93
Ilustración 48 Red estereográfica región 2. ....	93
Ilustración 49 Red estereográfica región 3. ....	94
Ilustración 50 Red estereográfica región 4. ....	94
Ilustración 51 Red estereográfica región 5. ....	95
Ilustración 52 Red estereográfica región 6 .....	95
Ilustración 53 Red estereográfica región 7. ....	96
Ilustración 54 Red estereográfica región 8. ....	96
Ilustración 55 Red estereográfica región 9. ....	97
Ilustración 56 Red estereográfica región 10. ....	97
Ilustración 57 Red estereográfica región 11. ....	98
Ilustración 58 Red estereográfica región 12. ....	98
Ilustración 59 Red estereográfica región 13. ....	99
Ilustración 60 Red estereográfica región 14. ....	99
Ilustración 61 Red estereográfica región 15. ....	100
Ilustración 62 Red estereográfica región 16. ....	100
Ilustración 63 Red estereográfica región 17. ....	101
Ilustración 64 Red estereográfica región 18. ....	101
Ilustración 65 Red estereográfica región 19. ....	102
Ilustración 66 Red estereográfica región 20. ....	102
Ilustración 67 Red estereográfica región 21. ....	103

Ilustración 68 Red estereográfica región 22. ....	103
Ilustración 69 Red estereográfica región 23. ....	104
Ilustración 70 Red estereográfica región 24. ....	104
Ilustración 71 Red estereográfica región 25. ....	105
Ilustración 72 Red estereográfica región 26. ....	105
Ilustración 73 Red estereográfica región 27. ....	106
Ilustración 74 Red estereográfica región 28. ....	106
Ilustración 75 Red estereográfica región 29. ....	107
Ilustración 76 Red estereográfica región 30. ....	107
Ilustración 77 Curva de fragmentación región 1. ....	108
Ilustración 78 Curva de fragmentación región 2. ....	108
Ilustración 79 Curva de fragmentación región 3. ....	109
Ilustración 80 Curva de fragmentación región 4. ....	109
Ilustración 81 Curva de fragmentación región 5. ....	109
Ilustración 82 Curva de fragmentación región 6. ....	110
Ilustración 83 Curva de fragmentación región 7. ....	110
Ilustración 84 Curva de fragmentación región 8. ....	110
Ilustración 85 Curva de fragmentación región 9. ....	111
Ilustración 86 Curva de fragmentación región 10. ....	111
Ilustración 87 Curva de fragmentación región 11. ....	111
Ilustración 88 Curva de fragmentación región 12. ....	112
Ilustración 89 Curva de fragmentación región 13. ....	112
Ilustración 90 Curva de fragmentación región 14. ....	112
Ilustración 91 Curva de fragmentación región 15. ....	113
Ilustración 92 Curva de fragmentación región 16. ....	113
Ilustración 93 Curva de fragmentación región 17. ....	113
Ilustración 94 Curva de fragmentación región 18. ....	114
Ilustración 95 Curva de fragmentación región 19. ....	114
Ilustración 96 Curva de fragmentación región 20. ....	114
Ilustración 97 Curva de fragmentación región 21. ....	115
Ilustración 98 Curva de fragmentación región 22. ....	115



Ilustración 99 Curva de fragmentación región 23. ....	115
Ilustración 100 Curva de fragmentación región 24. ....	116
Ilustración 101 Curva de fragmentación región 25. ....	116
Ilustración 102 Curva de fragmentación región 26. ....	116
Ilustración 103 Curva de fragmentación región 27. ....	117
Ilustración 104 Curva de fragmentación región 28. ....	117
Ilustración 105 Curva de fragmentación región 29. ....	117
Ilustración 106 Curva de fragmentación región 30. ....	118
Ilustración 107 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.....	120
Ilustración 108 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio. ....	121
Ilustración 109 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.....	121
Ilustración 110 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.....	122
Ilustración 111 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio. ....	122
Ilustración 112 Gráfico Circular Variance vs número de bloques .....	123
Ilustración 113 Gráfico Circular Variance vs número de cuñas. ....	124
Ilustración 114 Gráfico Circular Variance vs volumen medio.....	124
Ilustración 115 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.....	125
Ilustración 116 Circular Variance vs Número de cuñas. ....	125
Ilustración 117 Circular Variance vs Número de bloques. ....	126
Ilustración 118 Circular Variance vs Volumen medio. ....	126
Ilustración 120 Gráfico P32 simulado vs estimado. ....	128
Ilustración 121 Gráfico P32 simulado vs promedio P32 estimado. ....	128
Ilustración 122 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio de bloques.....	129
Ilustración 123 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.....	129
Ilustración 124 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.....	130

## Índice de Tablas

Tabla 1 Parámetros geotécnicos para intensidad de fracturas (Modificada de Golder Associates Ltd, 2008) .....	25
---	----

Tabla 2 Parámetro "A". Extraído de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972). .....	49
Tabla 3 Parámetro "B" Extraído de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972). .....	49
Tabla 4 Parámetro "C" Extraído de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972). .....	50
Tabla 5 Clasificación geomecánica RMR, Extraído de (Bienawski 1989).....	52
Tabla 6 Pautas para la excavación y fortificación para túneles de 10m de avance de acuerdo con RMR, Extraído de (Bienawski 1989) .....	53
Tabla 7 Orientaciones de Sets estructurales, Fuente: Elaboración propia. ....	58
Tabla 8 Sustracción de sets y respectivo P32, Fuente: Elaboración propia .....	61
Tabla 9 Esquema general del modelo experimental.....	66
Tabla 10 Efecto de la dirección de mapeo, Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 11 Número de cuñas vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.....	74
Tabla 12 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 13 P32 simulado, Número de cuñas, Volumen medio, Número de bloques y Circular variance para 5 sets simulados, Fuente: Elaboración propia. ....	80
Tabla 14 Efecto de la Circular Variance en la estabilidad de las cuñas. ....	119
Tabla 15 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.....	120
Tabla 16 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.....	122
Tabla 17 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.....	123
Tabla 18 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.....	125

## Resumen

Las campañas de sondajes son a menudo realizadas en minería para temas como, exploración geológica, para evaluación de depósitos o incluso reservas, el valor de lo anterior no es despreciable, y en algunos casos es tan alto que incluso determina la factibilidad del proyecto minero.

En base a lo anterior se propone una metodología que permite, utilizando información obtenida de muestreos unidireccionales (por ejemplo: sondajes) una estimación o incluso predicción de la fragmentación y estabilidad de cuñas de un macizo rocoso, para ello un gran número de casos de estudio fueron simulados usando modelos DFN, con la finalidad de probar la efectividad de la metodología.

A través de muestreos unidireccionales es posible obtener información de la orientación de sets estructurales, y con esta información se calcula y propone la variable Circular Variance “C.V”. Esta variable adopta valores en el intervalo  $]0,1[$ , además demostró un buen ajuste para la predicción de variables como: Número de bloques, Volumen medio de bloques y número de cuñas formadas en la excavación. Zonas donde la simulación de bloques y cuñas es alta, los valores de “C.V” son cercanos a 1, y en casos contrarios los valores de “C.V” son cercanos a 0, arrojando una correlación del tipo exponencial.

La motivación principal de esta investigación era la de otorgar un uso extra al registro que se posee de sondajes (“logging”), para ello se propone una variable cuyo cálculo es posible de obtener mediante este, la variable propuesta explica correctamente el comportamiento del macizo en términos de fragmentación, sin embargo, esta como tal no explica en totalidad dicha fragmentación del macizo rocoso, adicionalmente es necesario un estudio de la intensidad de fracturas de la zona. Para esta intensidad una metodología que estima de manera similar la intensidad de fracturas ambas fueron puestas a prueba que permite superar esta adversidad en el terreno mostrando de buenos resultados.

## Abstract

Drill cores are usually manufactured for mining use, specifically for things like geologic exploration or to evaluate the reservoirs of an ore deposit, its cost is high, and it must not be underestimated, in some cases is so expensive that determines the feasibility of the mining project.

Keeping the latter in mind, a methodology based in unidirectional sampling (for example: drill core's logging) is proposed. This methodology allows to estimate the fragmentation and stability of wedges in a rock mass. Several experiments were performed to test the effectiveness of this methodology.

Through unidirectional sampling is possible to obtain information about the orientation of joint sets, and with this information the variable Circular Variance "C.V." is calculated and proposed. This variable takes values in the interval  $]0,1[$ , showing that for high values (near to 1) the number of blocks (fragmentation), Average volume of blocks (fragmentation) and number of wedges formed in the excavation (stability) are maximum, on the contrary, areas where the simulation of blocks and wedges are the lowest, for values of "C.V" are near to 0, proving with this an exponential type of correlation.

The main motivation of this research was to grant an extra use to the record that is obtained through drill cores ("logging"), for this a variable is proposed, this variable explains correctly the behavior of the rock mass in terms of fragmentation, however, this as such cannot fully explain rock mass's fragmentation, additionally a study of the fracture intensity within the area of study is necessary, therefore is recommended an estimation of "P32" (Fracture intensity) beforehand. A methodology to obtain this "P32" in drill cores was also tested, the use of these two variables together present the most accurate results.

## Agradecimientos

Agradezco en primera instancia a mi familia por su incondicional apoyo en cada decisión durante mi vida, también al profesor Amin por compartir su conocimiento y sabiduría además de facilitarme las herramientas necesarias para poder cumplir con esta larga tarea. Durante el desarrollo de esta memoria fue necesario pasar largas jornadas trabajando en la simulación y evaluación de túneles es por ello por lo que se agradece a la Universidad de Talca, por entregar una agradable y cálida casa de estudios además de la educación recibida en este lugar, en especial al departamento de ingeniería civil de minas por su sala de memoristas, siempre con buen aseo iluminación y acceso a wifi.

A mis amigos y futuros colegas con los que disfruté de buenas tardes jugando ping pong o compartiendo en algún lugar de Curicó luego de haber pasado mucho tiempo trabajando durante el día en la memoria, también a los chicos del club de boxeo de la Universidad de Talca, Utalfighters quienes conocí este semestre y fueron clave para eliminar el stress durante esta etapa, así como también a las personas con las que viví durante mi estadía en Curicó compartiendo cenas viendo películas y otras tantas actividades que hacían muy grato mi día a día en la ciudad.

## Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se proporciona información para entender la memoria como tal, para ello se presenta en breve: el argumento detrás de esta memoria, también se describe la finalidad de esta, los resultados que se esperan de esta investigación y como se espera obtenerlos.

### 1.1 Motivación

En mecánica de rocas, la caracterización del macizo rocoso se basa en dos grandes factores la roca intacta y sus discontinuidades, estas últimas pueden tener diferentes características geomecánicas que afectan el comportamiento de todo el macizo rocoso. El análisis de estas discontinuidades es un factor crítico en lo concerniente a la estabilidad de macizos rocosos. En esta memoria se estudiará el efecto que estas discontinuidades tienen en la formación de cuñas, y como la orientación que estas tengan afectan la estabilidad y la fragmentación, no está de más, mencionar que este es un problema sumamente complejo debido a que cada macizo rocoso es único y cada uno presenta su propia configuración geológica. Esto último, sin embargo, no forma parte de esta investigación, pues se tiene como objetivo desarrollar un método más general que explique temáticas como estabilidad y fragmentación independiente del tipo de mineralización presente, en lugar de uno específico para cada tipo de roca en cuestión.

En proyectos mineros se suele contar con mucha información proveniente de sondajes y es esto último lo que motiva a esta memoria. El poder darle un segundo uso a este material presente en el proyecto, o lo que es mejor, lograr conocer aún más el macizo rocoso, a través del uso de información ya disponible y que no requiera de una inversión mucho mayor como la realización de otro tipo de estudio.

## 1.2 Descripción del problema

La memoria está basada en la geometría de las discontinuidades y como estas interactúan entre sí dentro del espacio formando o no cuñas/bloques, el problema en sí ha sido simplificado, dado lo difícil que sería obtener todos los parámetros en el terreno, a través de un sondaje por ejemplo sería posible obtener la orientación de los planos de discontinuidad su dip direction y su dip, sin embargo, otras características de estos planos no son posibles de obtener de esta manera y requerirían de esfuerzos mayores lo cual implica mayores inversiones tanto de tiempo como de dinero, algunos de estos parámetros serían por ejemplo la ondulación de las discontinuidades, el largo de estas discontinuidades entre otras. En esta memoria se consideraron los planos sin ondulación, así como también los parámetros de forma de discontinuidad se considera, que los planos de discontinuidad tienen forma de discos circulares.

La inferencia de estos parámetros en el terreno es obtenida de fuentes de información como borehole, scanlines y áreas de muestreo, las soluciones actuales son a menudo aproximaciones especialmente, debido al principal problema de que toda la información se encuentra por debajo de lo que se está observando en el terreno (profundidad).

## 1.3 Solución propuesta

La solución a la problemática se resuelve en esta memoria a través de la utilización de una matemática que permite determinar qué tan paralelas o perpendiculares son los planos de discontinuidad entre sí, en base a la hipótesis de que la generación de cuñas requiere planos de discontinuidad con orientaciones variadas es decir que estas se crucen y no estén paralelas entre sí, de esta manera se realiza un estudio que permite determinar si las discontinuidades tienen una dirección similar o no, entregando un valor cercano a 0 si estas tienen similar orientación o por contraparte si las discontinuidades en estudio tienen múltiples

orientaciones este valor será cercano a , es en este último caso donde se espera que la fragmentación así como el número de cuñas sea máximo.

## 1.4 Objetivos

### General

- Estimar estabilidad y fragmentación de una excavación en términos de formación de cuñas en sus caras (estabilidad) y número de bloques formados (fragmentación), utilizando información obtenida de muestreos unidimensionales relativa a los planos de discontinuidad (su orientación).

### Específicos

- Establecer zonas de Alta o baja fragmentación basándose en la orientación de las discontinuidades utilizando registro en 1D.
- Establecer zonas de Alta o baja estabilidad basándose en la formación de cuñas, utilizando información de la orientación de los planos de discontinuidad mapeados mediante registro en 1D.
- Definir los parámetros críticos para realizar el análisis de estabilidad y fragmentación.

## 1.5 Alcances del proyecto

- Simulación de redes de fractura en base a distribuciones de probabilidad más apropiadas.
- Solo se estudiarán parámetros del tipo geométricos, y no parámetros geológicos para predecir la estabilidad y fragmentación.
- Las Discontinuidades modeladas serán planos circulares sin elongación, ni curvatura.



## 1.6 Metodologías y herramientas utilizadas

Se utilizará el software FracMan perteneciente a Golder Associates, el cual entre otras funciones permite la realización de análisis de estabilidad de cuñas y la simulación de redes de fracturas, tal y como se ve en las siguientes figuras.

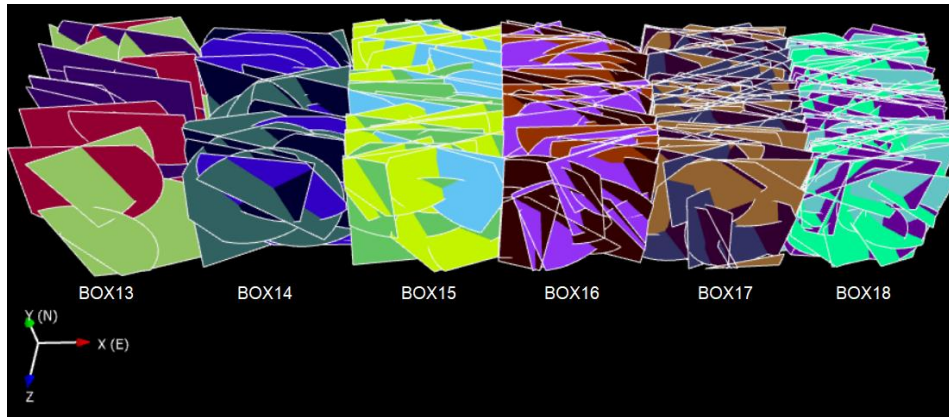


Ilustración 1 Redes de fracturas en Fracman cada color representa pertenencia a un joint set.

Fuente 1 Elaboración Propia.

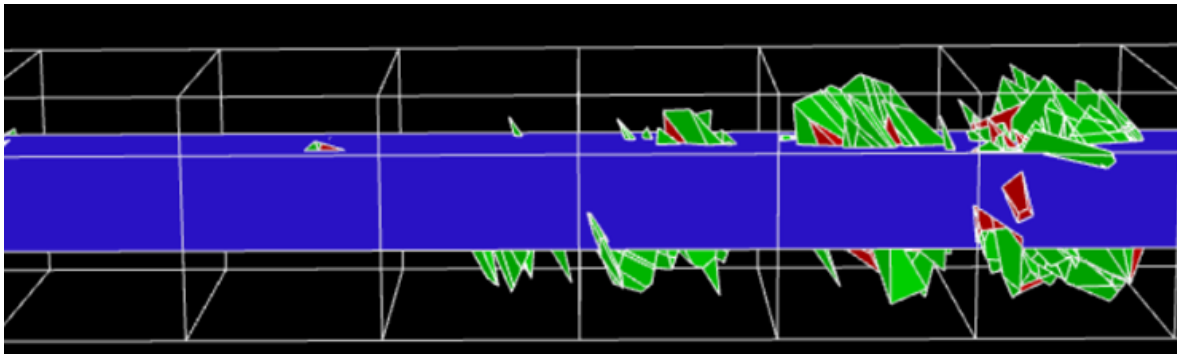


Ilustración 2 Cuñas generadas para las redes de fracturas simuladas.

Fuente 2 Elaboración propia.

La estructura de la metodología está simplificada en los siguientes pasos.

1. Recopilación de datos necesarios para el análisis; se listan a continuación:
  - a. Grado de Fracturas, información referida a los sets de fracturas número de sets y espaciamiento entre ellos.
  - b. Patrón de Discontinuidades: esta medición se subdivide en 2 características, Número de discontinuidades y Orientación del principal set de Discontinuidades el primero fue simulado en base a P32 otorgando

varios valores a este debido a la naturaleza de la investigación, las orientaciones de los sets de discontinuidad fueron obtenidas de información proveniente de un sitio minero.

- c. Características de las discontinuidades: fue simulado y se estudiará los efectos que este puede tener (esto incluye parámetros como rugosidad de la discontinuidad, ondulación de esta, alteración por desgaste, tipo de relleno de la discontinuidad, largo de la discontinuidad y separación entre discontinuidades). Por temas de simplificación de la problemática se consideraron las discontinuidades con forma de discos planares.
- d. Esfuerzos alrededor del túnel: Dependen netamente de la profundidad y de la densidad del macizo rocoso, para el estudio de generación cuñas no es un parámetro relevante.

## 2. Estudio y análisis de los datos.

- Inferir las distribuciones de los parámetros.
  - Datos duplicados, pérdida de datos, datos mal rotulados.
3. Construcción de un modelo 3D, en base a la información de fracturas.
  4. Realización de análisis de estabilidad de cuñas y fragmentación.
  5. Simular diferentes líneas tipo scanline e identificar las fracturas que detectan estas.
  6. Cálculo de la variable Circular Variance. e intensidad de fracturas a través de lo obtenido por las scanlines para cada caso.
  7. Analizar relaciones entre estabilidad de bloques y fragmentación simulada versus información obtenida por las scanlines.

## 1.7 Resultados esperados

Para los lugares o zonas donde las fracturas posean orientaciones variadas el valor de la variable propuesta Circular variance ("C.V") se espera sea cercano a 1 y a su vez sean estos lugares donde se encuentre un gran número de cuñas y una

fragmentación más pequeña, de ser así podría decirse que se cumplen los objetivos específicos 1 y 2.

Debido a la complejidad del problema en 3 dimensiones, se estima que la variable Circular Variance por sí sola no pueda explicar en su totalidad la fragmentación y la formación de cuñas, para ello debiese existir otra variable que en conjunto con la Circular Variance expliquen la problemática, se espera que esta variable sea la intensidad de fracturas, cumpliéndose así el objetivo específico 3.

Si ambos supuestos anteriores son posibles de determinar mediante información solamente obtenida de scanlines (muestreo unidimensional) se cumple el objetivo general de esta memoria.

## 1.8 Organización de la memoria escrita

El siguiente contenido de esta memoria se encuentra dividido en capítulos de los cuales a continuación se entrega una breve descripción de cada uno.

- Capítulo 2 Marco teórico “Revisión bibliográfica y estado del arte”

Este capítulo explica todo el conocimiento científico relevante, información definiciones, ecuaciones, teorías y estudios anteriores que son necesarios conocer para entender el contenido de esta memoria.

- Capítulo 3 Metodología, Simulación de redes de fracturas y mapeo.

Este capítulo explica la metodología experimental realizada para la comprobación de la teoría y de la variable (Circular Variance “C.V.”) propuesta.

- Capítulo 4 Resultados experimentales y parámetros calculados

En esta sección se presentan los resultados fruto de la experimentación realizada y la comparativa con respecto a la metodología propuesta, para ello se realizan distintos tipos de análisis, comparando y contrastando C.V. con distintas variables relativas a los temas de fragmentación y estabilidad.

- Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.

En este Capítulo se entregan conclusiones respecto al estudio realizado y además recomendaciones para futuros estudios de este tipo.

## Capítulo 2 Marco teórico “Revisión bibliográfica y estado del arte”

Para la clasificación y estimación estructural, es decir, determinar qué tan competente puede ser el macizo rocoso a estudiar, a lo largo de la historia se han desarrollado diferentes tipos de métodos de caracterización para macizos, estas caracterizaciones han ido evolucionando con respecto al tiempo, en esta primera parte, revisión bibliografía se entregan conceptos definiciones y distribuciones que son básicas para entender el estudio, posterior a ello se explica la teoría y el funcionamiento que existe detrás de este tipo de análisis, finalmente se relata en breve los avances que se han tenido durante la historia en el área de la caracterización geomecánica.

### 2.1 Discontinuidades

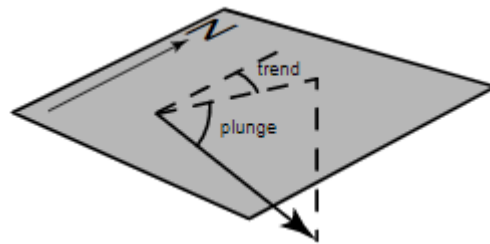
Una discontinuidad es definida como toda quiebre mecánico o fractura cuya fuerza de tensión es negligente en la roca (Priest S. D., 1993). Una discontinuidad en el marco Tridimensional es representado comúnmente como un plano, pese a que en la realidad esto pueda ser un poco más complejo encontrándose así planos con diferentes tipos de curvatura, esto se simplifica a un plano con forma de disco para facilitar los estudios de estas problemáticas y la ondulación del plano es agregada como parámetro extra (Qinghua, John-Paul, & Chin-Fu, 2016) (Zhang & Einstein, 2000) (Baecher, Lanney, & Einstein, 1977).

Las discontinuidades pueden ser representadas por sus ángulos de dirección y orientación, pero para ello es necesario explicar los conceptos de orientación para líneas y planos en 3D (Hudson & Priest, 1979).

Para el caso de líneas en un espacio 3D, el par de ángulos Trend y Plunge entregan una medida de la orientación de dicha línea y son medidos de la siguiente manera.

Plunge: ( $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ ) este ángulo agudo es medido en el plano vertical entre la línea y el plano horizontal, la línea bajo el plano es tomada como signo positivo, y por sobre este plano horizontal el signo es negativo (Priest S. D., 1993).

Trend ( $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ ) este es el azimut geográfico medido en rotación de las agujas del reloj desde el norte ( $0^\circ$ ). Todo plano vertical posee dos direcciones de azimuts geográficas, separadas entre sí por  $180^\circ$ ; Trend es el azimut que corresponde a la dirección de Plunge de la línea (Priest S. D., 1993).



*Ilustración 3 Esquema explicativo de Trend y Plunge.*

*Fuente 3 extraído de (Mardía, 1972)*

De esta manera la orientación de cualquier línea puede ser representada de forma única en términos de Trend y Plunge  $\alpha$  y  $\beta$ , en notación de 3 dígitos y 2 dígitos separado por un “slash” y omitiendo el signo “ grados ° ”, por ejemplo 268/31 hace referencia a una línea de Plunge hacia abajo con un ángulo  $31^\circ$  respecto de la horizontal y con una dirección rotada  $268^\circ$  respecto del norte (Kenneth, 1958).

Un plano puede ser definido como un número infinito de líneas coplanares irradiándose sobre un punto arbitrario, la línea de mayor inclinación (dip) de un plano no horizontal es la línea imaginaria cuyo Plunge excede el de todas otras líneas en el plano, Trend “ $\alpha$ ” y Plunge “ $\beta$ ” de dicha línea de mayor dip en un plano reciben los nombres de “dip dirección” y “dip angle”.

## 2.2 Origen de las discontinuidades

Las discontinuidades pueden ser formadas de múltiples formas como lo son cambios en los esfuerzos in-situ de la matriz rocosa, cambios en la temperatura, mineralización, así como también de forma artificial por actividades mineras tales como la perforación y tronadura o excavaciones, desde un punto de vista geológico cada fractura de manera singular puede haber tenido a lo largo de la historia una compleja serie de cambios que la llevaron a su forma en la actualidad (Gabrielsen, 1990).

### **2.3 Fallas**

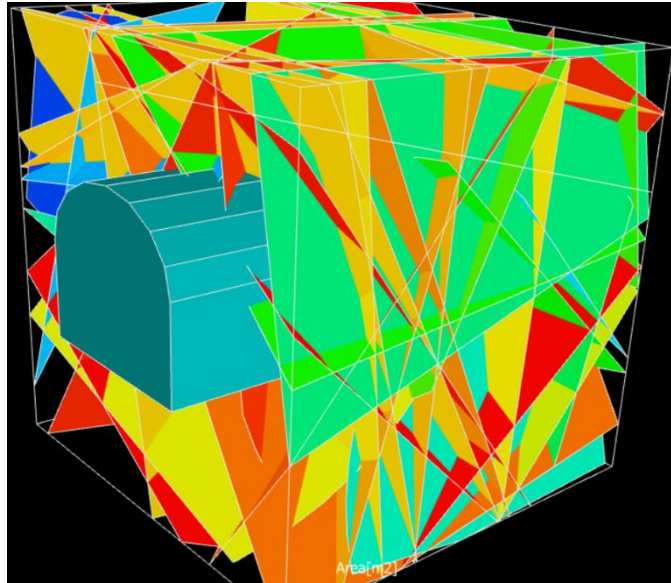
En geología una falla es definida como un plano de fractura o discontinuidad en un volumen de roca sobre el cual ha habido algún tipo de movimiento como resultado del desplazamiento de la tierra, se asume que una falla ocurre cuando existe un cambio en los esfuerzos in-situ tal que produce que el esfuerzo de corte supere a la cizalle del material rocoso (Hudson & Priest, 1979).

### **2.4 Estratificación**

Es una superficie creada por el cambio en factores como tamaño de grano, orientación de estos, la mineralogía y la composición química durante la depositación de una roca sedimentaria. La estratificación no siempre crea discontinuidades en muchos casos forma levemente un cambio en el color o textura. En la mayoría de las rocas sedimentarias, algunos planos de estratificación se expresan como discontinuidades. Los planos de estratificación generalmente forman las más extensas discontinuidades en el macizo rocoso sedimentario, algunas veces se pueden extender por muchos kilómetros a través del yacimiento (Gabrielsen, 1990).

## 2.5 Discrete Fracture Network (DFN)

Una Discrete Fracture Network o “DFN” es una representación de fracturas en un medio interconectadas en una red de elementos siguiendo las observaciones tomadas en terreno, tal como se observa en la siguiente Ilustración.



*Ilustración 4 Representación de ideal de un DFN en una excavación ficticia con forma de herradura, Los colores indican Área de fracturas.*

*Fuente 4 Elaboración propia en Fracman.*

El modelo DFN es un modelo estocástico basado en distribuciones probabilísticas para simular características geológicas y geométricas, que busca describir todo el sistema de fracturas del macizo rocoso, mediante observaciones en terreno y sistemas estadísticos.

Los usos de los modelos DFN se encuentran principalmente en la predicción de variables geométricas como lo es la fragmentación. (Elmo, Rogers, Stead, & Eberhardt, 2014) (Elmoultie, Krähenbühl, & A., 2016) La importancia de esto último en áreas como “caving” (Tollenaar, 2008) o en el tiempo de carguío, resulta vital debido al impacto que tiene la fragmentación en la producción.



Avances tecnológicos como “LiDAR” (light detection and ranging) fotogrametría digital, Sistema de posicionamiento global (“GPS”), receptores y vehículos aéreos no tripulados (“UAVs”) han mejorado considerablemente la extracción de datos, en terreno no accesible, donde por los medios tradicionales como scanline o mapeo de ventana (“Window mapping”) la obtención de información no fuese posible o resultase muy costosa. Lo anterior en conjunto con técnicas modernas de manejo de datos complementan la información del macizo in-situ, haciendo que el trabajo de los datos requeridos tanto como para análisis y construcciones de modelos DFN sean mucho más precisos y confiables, ejemplos de estas técnicas se encuentran en (Sturzenegger, Stead, & Elmo, 2011) (Grenon, Landry, & Lajoie, 2017) (Salvini, Mastrococco, Seddaiu, Rossi, & Vanneschi, 2017).

La naturaleza discontinua y heterogénea intrínseca del macizo rocoso debe ser reflejada en el modelo simulado es por ello que la toma de datos para su construcción debe ser lo más certera posible, autores como (Hadjigeorgiou, 2012) (Elmo, Stead, & Rogers, Guidelines for the quantitative description of discontinuities for use in discrete fracture network engineering., 2015) han demostrado las consecuencias de la obtención inadecuada de datos, y como esta necesariamente limita la capacidad de predicción del modelo DFN generado.

Las ventajas de estos modelos DFN sobre los modelos convencionales, es la mejor capacidad de describir problemas a una escala local, debido a la habilidad de capturar las fracturas y todas sus propiedades de una manera certera, a diferencia de los modelos de medio continuo a gran escala, también pueden capturar la heterogeneidad de los sistemas de fracturas explícitamente describiendo los elementos claves del sistema, asimismo es posible una ruta de comprobación entre la modelación y los datos obtenidos en terreno, además de que las propiedades de las fracturas son conservadas durante todo el proceso de modelamiento.

Los parámetros mínimos para la caracterización y elaboración de estos DFN son: número o intensidad de fracturas, orientación, y tamaño de las discontinuidades



dentro del área de estudio. Numerosas metodologías han sido propuestas para estimar dichos parámetros, algunas de ellas están en (Beacher G. , 1980) y (Laslett, 1982) (Beacher G. B., 1983).

## 2.6 Intensidad de fracturas

Los patrones de fracturas son descritos mediante distribuciones para orientación, tamaño, ubicación espacial e intensidad (Dershowitz & Einstein, 1988), dentro de estos intensidad es uno de los más importantes, la intensidad de fracturas es generalmente denominada en términos de espaciamiento ( $S_f$ ,  $S'_f$ ,  $S''_f$ ) (Priest & Hudson, 1976) que corresponde a la distancia media dentro de un determinado sets de fracturas, medido en una línea particular como borehole o scanline, esto si bien es muy fácil de medir en terreno no lo es tanto para describir fracturas en dos o tres dimensiones, además depende subjetivamente de la definición del set de discontinuidad en terreno.

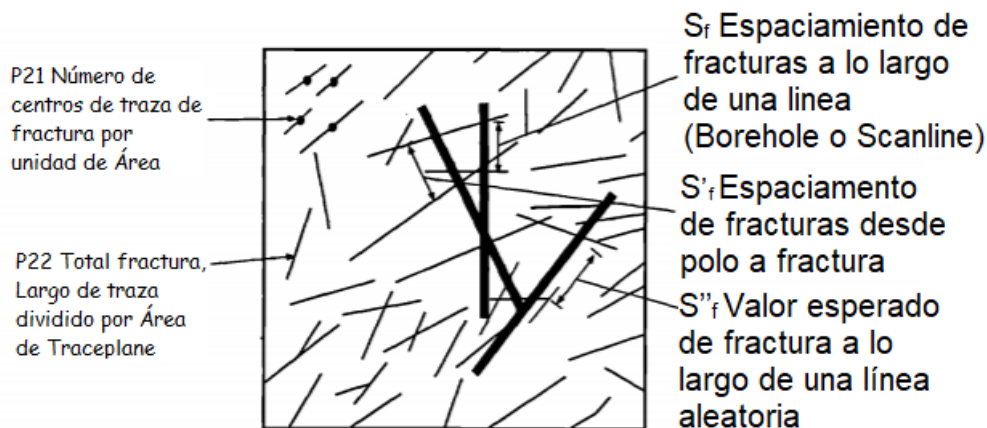


Ilustración 5 Medidas de intensidad en una y dos dimensiones

Fuente 5 (modificada de Dershowitz, 1992)

## 2.7 Medidas de intensidad de Fracturas

Las unidades de intensidad de fracturas están basadas según la dimensión de la región y la de la fractura (ver Tabla 1). Los formatos para medidas de intensidad de fractura están basados en la letra P (“persistence”) (Dershowitz & Herda, 1992) seguido por el subíndice que numérico que indica la dimensión de la región, de esta manera  $P_1$  representa una dimensión (Línea)  $P_2$  representa un plano,  $P_3$  representa 3 dimensiones, un volumen.

Tabla 1 Parámetros geotécnicos para intensidad de fracturas (Modificada de Golder Associates Ltd, 2008)

Dimensión de muestreo	Dimensión de la medida			
	0	1	2	3
1	<b>P10</b> N° fracturas por unidad de largo de sondaje	P11 Largo de fracturas por unidad de largo		
2	P20 N° de fracturas por unidad de área	<b>P21</b> Largo de fracturas por unidad de área	P22 Área de fracturas por área	
3	P30 N° de fracturas por unidad de volumen		<b>P32</b> Área de fracturas por unidad de volumen	P33 Volumen de fracturas por unidad de volumen

## 2.8 Tamaño de fracturas

El tamaño de las fracturas se refiere a la superficie (área) del plano de una discontinuidad dentro del macizo rocoso, esto es una definición simplificada dado que las fracturas son estructuras tridimensionales que tienen tanto apertura como ondulación en la tercera dimensión, sin embargo, en la gran mayoría de los DFNs por temas prácticos son tratadas como planos bidimensionales en el espacio.

En la práctica, el tamaño de fractura es muy difícil de medir debido a que los límites de la fractura no son siempre visibles y analizar al detalle el largo de las

fracturas en terreno podría resultar muy costoso y requeriría de mucho tiempo, aún si esto fuese posible. En lo concerniente a DFN el tamaño puede ser obtenido desde terreno mediante (La pointe, 1993) o estimada a través de distribuciones (Golder, 2017).

## 2.9 Forma de fracturas

La forma de las fracturas dentro de lo que concierne a los modelos tridimensionales de redes de fracturas (DFN), a menudo son aproximadas como discos o planos teniendo solo área en 2 dimensiones, la forma de la superficie como tal, es decir, que tan ondulada esta puede ser es considerado como parámetro extra comúnmente denominado “waviness” y es tratado de forma separada, utilizando coeficientes de rugosidad o de waviness. (International Society for Rock Mechanics Comission on standardization of laboratory field tests, 1978)

## 2.10 Orientación de las fracturas

La orientación de las fracturas hace referencia al strike y dip al plano de fractura, Medido con respecto a la horizontal y las direcciones cardinales, pese a que la orientación puede ser medida y ajustada mediante varias metodologías para agrupar fracturas en sets, es típicamente basado en fracturas con orientaciones similares y es más subjetivo. Existen varias metodologías del tipo estocásticas para ajustar grupos de polos con similares orientaciones en un mismo set. Así como también es posible de realizar este proceso en terreno contando con un personal de amplia experiencia, sin embargo, lo anterior introduce un alto grado de subjetividad. Por otra parte, códigos de computadora resultan más objetivos, pero no son capaces de distinguir patrones complejos. Importante es mencionar que si la base de datos de sets no está agrupada correctamente esto puede producir resultados inservibles, debido a la gran relevancia que tiene el parámetro como input en la generación de DFNs, es por ello que a menudo es asumido que la orientación de los sets sigue distribuciones estándares como Fisher o Bingham (Baecher & B, 1983) (R.S. Fisher, 1952).

## 2.11 Distribución espacial de las fracturas

Alude a la ubicación con la que serán generadas las fracturas en cada región del espacio 3 modelos (Lee, Lee, Yeh, & Lin, 2010) (Park, y otros, 2002) conceptuales deben ser entendidos.

1. Enhanced Beacher Model (EBM): Es una extensión del modelo de Baecher en el que se localizan las fracturas con la interacción de terminaciones de fracturas preexistentes.
2. Levy-Lee Fractal Model (LLFM): un modelo estocástico que usa un modelo Levy Lee Flight Fractal para producir clúster de pequeñas fracturas alrededor de fracturas grandes y dispersas.
3. Nearest Neighbor Model (NNM): un modelo simple y no estacionario en el que las distancias entre fracturas aumentan exponencialmente con respecto del valor de  $P_{32}$ .

## 2.12 Distribuciones de probabilidad y sus aplicaciones

### 2.12.1 Distribución normal

La distribución normal fue desarrollada por Carl Friedrich Gauss (1777-1855) el cual desarrolló y además formuló la ecuación para su curva más conocida como “campana de Gauss”.

La distribución normal denota el teorema central del límite, en donde los datos tienden a un valor medio, La mayor parte de la curva cae dentro de tres definiciones de la media. Pequeñas desviaciones estándares producen curvas más angostas, mientras que desviaciones mayores producen curvas más anchas. Es visto y usado de manera amplia en muchas aplicaciones. No obstante, poca evidencia existe para apoyar el uso de la distribución especialmente en los parámetros de ingreso al DFN, (particularmente tamaño de fractura y espaciamiento).

La distribución de una variable normal se determina por dos parámetros su desviación estándar y su media denotadas por “ $\sigma$ ” y “ $\mu$ ” respectivamente

$$f(x; u, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad (2.1)$$

### 2.12.2 Distribución Lognormal

En la distribución Lognormal, la variable de interés sigue una distribución normal, la cual está definida por una media y una desviación estándar; sin embargo, Lognormal puede tener un extremo “cola” mucho más largo que la distribución normal. Muchos fenómenos geológicos se han encontrado que siguen distribuciones Lognormal (Baecher, Lanney, & Einstein, 1977), como por ejemplo las trazas de las fracturas, lo cual no obstante, no indica que el tamaño de la fractura, es decir, el diámetro de su disco que está por debajo de esas trazas sea también del tipo Lognormal.

$$f(x; u, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad , x > 0 \quad (2.2)$$

### 2.12.3 Distribución Fisher

La distribución Fisher representa una distribución de vectores de orientación para un set de fracturas, es definida por un coeficiente de dispersión denominado “k”, el cual cuantifica el grado de agrupamiento de la distribución. La desviación angular del vector medio es denotada por  $\theta$  como se aprecia en la siguiente ecuación.

$$f(\theta) = \frac{k \sin(\theta) e^{k \cos(\theta)}}{e^k - e^{-k}} \quad (2.3)$$

Un valor grande de “k” implica que el nivel de dispersión de las orientaciones es menor, así como por otra parte los valores de “k” cercanos a 0 indican un nivel máximo o aleatorio de dispersión de los datos (R.S. Fisher, 1952).

## 2.13 Teoría de Bloques.

El objetivo de esta memoria es proporcionar una técnica que permita identificar las zonas donde la formación de bloques claves puedan generar problemas de estabilidad específicamente a través de la intersección de sets de discontinuidades con una excavación, su aplicación es para macizos donde el movimiento de bloques origina falla, ignorando así otros métodos de falla como lo son, toppling, squeezing y otros (Cundall, 1971) (Goodman & Shi, 1985) (Lanru Jing, 2000) (Shi, 1988).

El problema plantea un alcance propio, esto es, con el fin de poder encontrar y calcular los bloques creados por las intersecciones en un macizo rocoso, tres principales suposiciones deben ser asumidas, este problema conlleva los siguientes supuestos (Goodman & Shi, 1985).

1. Todas las superficies y planos de discontinuidades son asumidos completamente planos, esta suposición es una aproximación muy cercana a la realidad para el caso de discontinuidades y fallas, sin embargo, puede estar un poco equivocado para los casos de estratificación.
2. Los bloques definidos por los sistemas de discontinuidades se suponen rígidos, esto es, que la deformación y distorsión del bloque no es considerada. El problema es solo considerado desde una perspectiva geométrica y topográfica, posterior a ello los bloques pueden ser estudiados considerando deformaciones resistencias friccionales y esfuerzos.
3. Discontinuidades y superficie de excavación son parámetros de ingreso al cálculo por ello, los sets de discontinuidad se consideran como un promedio y a partir de un valor de  $P32$  para cada caso son simulados en base al promedio de Trend y Plunge (polo) de dicho set, considerando una distribución de Fisher con un valor de  $K$  igual 100, manteniendo de esta forma la dirección de dicho set.

En resumen, la teoría de bloques está basada en base a la geometría de la información obtenida a través del macizo rocoso, y utilizando ecuaciones de equilibrio básicas determinar los bloques que son claves en términos de estabilidad.

### 2.13.1 Bloque crítico (“Key block”).

En la teoría de bloques el objetivo principal es identificar los bloques alrededor de la excavación, según (Goodman & Shi, 1985), las intersecciones de numerosas discontinuidades generan y crean bloques de forma irregular de diferentes tamaños y forma en el cuerpo del macizo rocoso. Cuando la excavación es realizada, muchos bloques nuevos son formados con la adición de nuevas superficies (las paredes de la excavación generan nuevos planos y con ellos se favorece la formación de bloques), algunos de estos no serán posibles de moverse en el espacio (Chan & Goodman, 1983) (Diederichs & Kaiser, 1999) (Gen Hua Shi & Richard E. Goodman, 1981) (Lin, Fairhurst, & Starfield, 1987), esto debido, a su orientación tamaño y forma o porque otros bloques impiden el desplazamiento de los mismos, Algunos bloques se encuentran inmediatamente en la posición de deslizamiento y si esto ocurre cambia el estado de otros que se encontraban contenidos o confinados, la Ilustración 6 muestra los arcos de un acueducto romano en España que se sostiene sin la ayuda de fortificación, en este ejemplo cada bloque es un bloque crítico debido a que la pérdida de cualquiera de ellos significa el colapso de los demás.

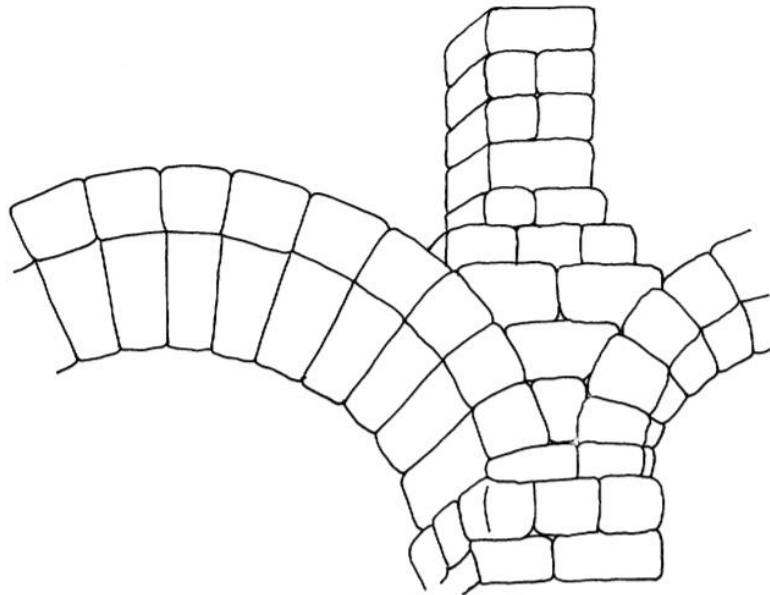


Ilustración 6 Esquema de acueducto Romano.

Fuente 6 Extraído de (Barton, 1977)

De manera análoga en túneles tenemos situaciones como la Ilustración 7 en donde se muestran los bloques críticos alrededor de una excavación.

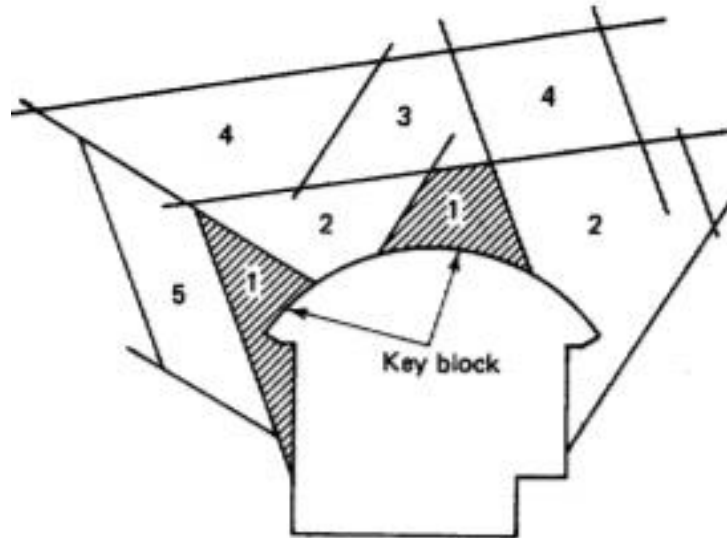


Ilustración 7 Bloques críticos en el arco de una excavación

Fuente 7 Extraído de (Goodman & Shi, 1985)

La pérdida de los bloques sombreados (1) permitiría el movimiento de los bloques (2), luego estos el de (3), y así sucesivamente, destruyendo la excavación.

### 2.13.2 Ecuaciones claves

- **Ecuación de una línea**

Considerando  $x$  como “el vector radial” desde el origen hasta el punto  $(X_i, Y_i, Z_i)$ . Una línea en dirección  $x_1$  a través de los puntos  $(X_0, Y_0, Z_0)$  es definida por la familia de puntos tal que.

$$x = x_0 + tx_i \quad (2.4)$$

En donde  $x_0$  es el vector de radio desde el origen hasta el punto  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , el parámetro “ $t$ ” toma cualquier valor real negativo o positivo. La ecuación vectorial anterior puede ser transformada a cartesianas reemplazando cada radio vector por sus coordenadas.



$$x = (X, Y, Z) \quad (2.5)$$

$$x_0 = (X_0, Y_0, Z_0) \quad (2.6)$$

$$x_1 = (X_1, Y_1, Z_1) \quad (2.7)$$

Volviendo a la ecuación vectorial en 2.4 se generan tres ecuaciones paramétricas de las que sus coordenadas son equivalentes a

$$X = X_0 + tX_0 \quad (2.8)$$

$$Y = Y_0 + tY_0 \quad (2.9)$$

$$Z = Z_0 + tZ_0 \quad (2.10)$$

- **Ángulos entre líneas.**

Considerando dos vectores “n<sub>1</sub>” y “n<sub>2</sub>” en el espacio.

$$n_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$$

$$n_2 = (X_2, Y_2, Z_2)$$

El ángulo entre “n<sub>1</sub>” y “n<sub>2</sub>” es dado por:

$$\cos(\alpha) = \frac{n_1 * n_2}{|n_1||n_2|} \quad (2.11)$$

En donde el símbolo \* simboliza el producto punto entre vectores

- **Ecuación de un plano.**

Teniendo “n<sub>p</sub>” como vector director normal a un plano “P”. El plano P es definido como un set de vectores “x” de manera que.

$$x * n_p = D \quad (2.12)$$

Donde D es constante y es la distancia perpendicular desde el origen del plano. Tal como se observa en la ilustración 8. La ecuación anterior puede ser convertida a coordenadas cartesianas por sustitución de lo siguiente:

$$x = (X, Y, Z) \quad (2.13)$$

$$n_p = (A, B, C) \quad (2.14)$$

$$AX + BY + CZ = D \quad (2.15)$$

Y por consiguiente las coordenadas del vector normal son:

$$A = \sin(a) \sin(B) \quad (2.16)$$

$$B = \sin(a) \cos(B) \quad (2.17)$$

$$C = \cos(a) \quad (2.18)$$

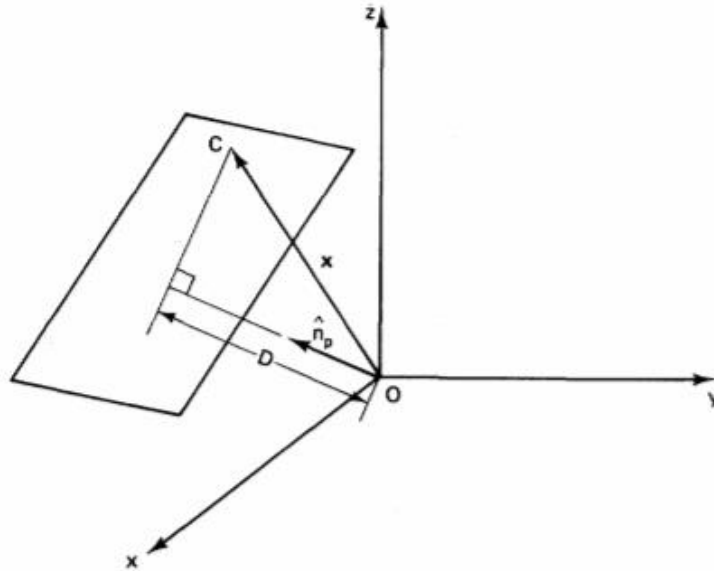


Ilustración 8 Esquema descriptivo de la ecuación de un plano.

Fuente 8 Extraído de Goodman & Shi 1985.

### Ejemplo Ecuación del plano:

Considerar un plano P con dip angle  $\alpha = 30^\circ$  y dip direction  $\beta = 320^\circ$  en sentido de las manecillas del reloj desde el norte. Este plano pasa por el punto (1,2,1) y su ecuación de acuerdo con (2.15) sería:

$$AX + BY + CZ = D$$

Y calculando su vector normal de acuerdo con (2.16), (2.117) y (2.18) tenemos que  $A = -0.32139$ ,  $B = 0.38392$ , y  $C = 0.86607$ .

Además, sabiendo que el plano pasa por el punto (1,2,1), por lo tanto

$$A + 2B + C = D \text{ resultando } D = 1.3106.$$

Su ecuación finalmente sería  $-0.32139X + 0.38302Y + 0.86607Z = 1.3106$

- **Intersección de dos planos.**

La intersección de dos planos de discontinuidad crea una arista en uno de los bordes del bloque, considerando 2 planos “P<sub>1</sub>” y “P<sub>2</sub>” con una línea de intersección “I<sub>12</sub>”. Vectores normales a los planos “n<sub>1</sub>” y “n<sub>2</sub>” respectivamente, como la intersección está contenida en cada plano y cada plano contiene solo líneas perpendiculares a su vector normal, entonces “I<sub>12</sub>” es perpendicular a ambos “n<sub>1</sub>” y “n<sub>2</sub>”. Una línea que es perpendicular a otras 2 líneas puede ser calculada a través del producto cruz, por lo tanto, la línea de intersección de “P<sub>1</sub>” y “P<sub>2</sub>” es paralela a.

$$I_{12} = n_1 \times n_2 \quad (2.19)$$

Resolviendo:

$$n_1 \times n_2 = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$I_{12} = [(Y_1Z_2 - Y_2Z_1), (X_2Z_1 - X_1Z_2), (X_1Y_2 - X_2Y_1)] \quad (2.21)$$

- **Esquina de un bloque (arista)**

Las coordenadas de una arista de un bloque responde a la solución de un 3 ecuaciones de planos que se intersecan, por ejemplo el vértice A definido por la intersección de los planos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> y P<sub>3</sub> es determinado por el punto (X,Y,Z) que resuelve el siguiente sistema de ecuaciones (Goodman & Shi, 1985).

$$\begin{aligned} A_1 X + B_1 Y + C_1 Z &= D_1 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 Z &= D_2 \\ A_3 X + B_3 Y + C_3 Z &= D_3 \end{aligned} \quad (2.22)$$

### 2.13.3 Volumen de un bloque poliédrico de “n” caras.

En este apartado se explica resumidamente el procedimiento para el cálculo del volumen de los bloques generados mediante la intersección de distintos planos en un espacio tridimensional, procedimiento aplicable a la temática de DFN, en donde se simulan de manera similar planos en un espacio representando las

discontinuidades mapeadas en terreno, Dicho procedimiento es posible de encontrar detalladamente en (Goodman & Shi, 1985).

La intersección de planos de discontinuidad genera bloques con variadas formas, la mayoría de ellas, en general, tendrá más de 4 caras. El procedimiento para calcular el volumen de cualquier bloque consiste en subdividirlo en tetraedros y luego utilizar la siguiente ecuación (2.23).

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1 \\ X_4 - X_1 & Y_4 - Y_1 & Z_4 - Z_1 \end{vmatrix} \quad (2.23)$$

Considerando bloques en 3D con “n” caras formadas por partes de “n” planos. Asumiendo que:

1. Para cada plano  $i$ ,  $i = 1 \dots n$ , se determinan las constantes  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  y  $D_i$ ; los coeficientes  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ , son calculadas a partir de dip y dip direction del plano “i” usando el ejemplo anterior (ver apartado “Ecuación de plano”), debido a que el ángulo de dip es siempre entre  $0 - 90^\circ$  el valor de  $C_i$  es siempre positivo, lo que significa que de las dos direcciones perpendiculares al plano “i” se considera aquella en cual el vector normal apunta hacia arriba (componente en “z” positiva). Mientras que el coeficiente D es un parámetro de entrada.
2. Calcular todas las coordenadas de todas las esquinas (vértices) posibles de los bloques. Un vértice de  $C_{ijk}$  es calculada como un punto de intersección de tres planos  $i$ ,  $j$ , y  $k$  (ecuación 2.22).

Posteriormente, se debe determinar que vértices realmente pertenecen a un bloque (es decir, aquellos que son realmente parte de un bloque).

El número de vértices calculado en el paso 2 es equivalente con el número de “n” objetos tomando 3 de ellos al mismo tiempo ( $C_n^3$ ), lo cual es equivalente a

$$C_n^3 = \frac{n!}{(n-3)! 3!}$$

Para un paralelepípedo (por ejemplo,  $n=6$ ) existen 20 posibles vértices; de los que solo 8 serán reales. El procedimiento para hacer selección de aquellos vértices reales es una solución simultánea de  $n$  inecuaciones que se presentan en 3 y 4.

3. Considerar una cara “ $m$ ”. examinar cada posible vértice  $C_{ijk}$ , y mantenerlo como un vértice real posible solo si sus coordenadas  $X_{ijk}$ ,  $Y_{ijk}$  y  $Z_{ijk}$  satisfacen que

$$A_m X_{ijk} + B_m Y_{ijk} + C_m Z_{ijk} \geq D_m \quad (2.24)$$

4. Repetir el paso 3 para cada cara considerada (ejemplo  $m = 1 \dots n$ ). Las posibles caras reales son aquellos candidatos que sobreviven el paso 3 para cada una de las caras.

Lo anterior explicado en un caso bidimensional más simple considerando 5 líneas que se intersecan entre si se aprecia en la siguiente ilustración

$$C_5^2 = \frac{5!}{(5-2)!(2)!} = 10 \quad (2.25)$$

Para este caso se debe cumplir que

$$A_1 X_{ij} + B_1 Y_{ij} \leq D_1 \quad (2.26)$$

Lo anterior elimina como Candidatos a los vértices  $C_{34}$ ,  $C_{35}$  y así sucesivamente resultando solo en las esquinas que se aprecian en la siguiente ilustración.

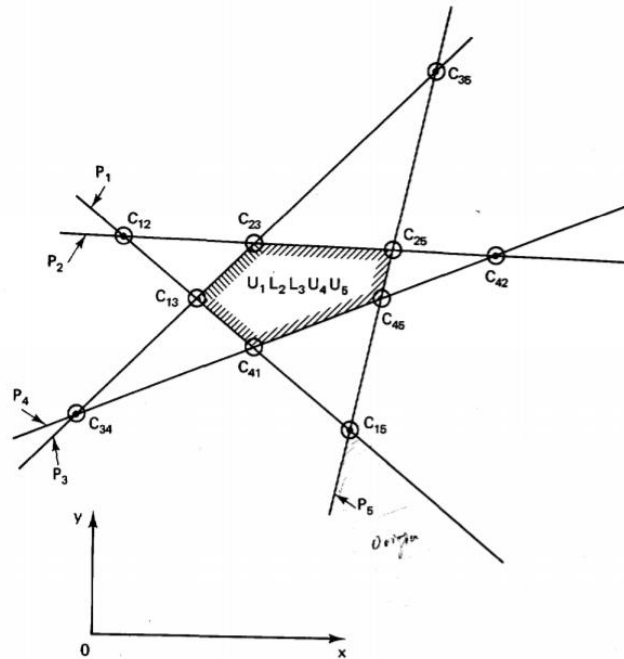


Ilustración 9 Vértices reales de un polígono dado.

Fuente 9 Extraído de (Goodman & Shi, 1985).

De esta manera se identifican correctamente las coordenadas de todos los vértices  $C_{ijk}$  de un bloque poliédrico. Luego se deben encontrar las caras de los polígonos, considerando un polígono en 2 dimensiones como el de la ilustración anterior, la intersección de 5 líneas produce polígonos de 3,4 y 5 caras, Lo anterior en 3 dimensiones resulta en que la intersección de “n” planos puede generar bloques de 4 hasta “n” caras.

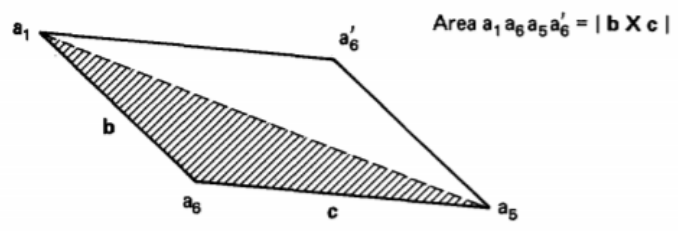
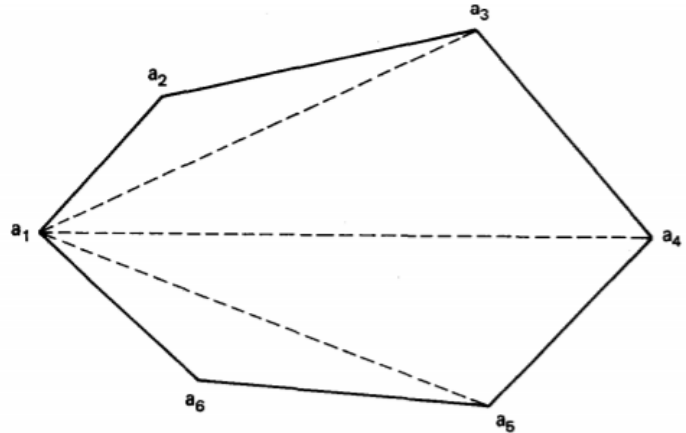
5. Determinar que caras pertenecen a un bloque dado. Una cara real está definida por cualquier subconjunto de 3 o más vértices reales, que tienen un índice en común, por ejemplo. Cara “m” (perteneciente al plano m) es una región triangular entre las esquinas  $C_{1m2}$ ,  $C_{34m}$ , y  $C_{m25}$ .
6. Determinar los lados (aristas) de un bloque dado. Una Arista real es una línea entre un par de vértices reales  $C_{ijk}$  que tienen en común dos índices, por ejemplo, un vértice es la línea que conecta los vértices  $C_{ij3}$  y  $D_{4ij}$ . Esta línea es paralela a la línea de intersección ( $l_{ij}$ ) de los planos i y j.

Los siguientes pasos dividen al primer poliedro en pirámides poligonales, y luego en tetraedros debido a la subdivisión de las bases en triángulos.

7. Se elige un vértice real " $C_{ijk}$ " como un ápice de la pirámide. La elección es arbitraria y solo un vértice es seleccionado.  $C_{ijk}$  es el punto de intersección de los planos "i", "j" y "k", excluyendo estos 3, subdividir cada uno de los otros (n-3) caras del bloque en triángulos, de la siguiente manera. Los vértices de la cara "m" son subsets de las "t" esquinas reales del poliedro que tiene "m" como uno de sus índices. Ahora subdividir la cara "m" en triángulos a través de la selección de un vértice y conectándolo enseguida con los puntos finales de cada arista de la cara "m". Las aristas del polígono "m" fueron encontradas en el paso 6 y tienen "m" como índice en común.

La Ilustración 10 muestra el procedimiento previamente descrito a través de la selección de un vértice "a" como vértice de todos los triángulos, el polígono ( $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ ) es dividido en los triángulos ( $a_1a_2a_3$ ), ( $a_1a_3a_4$ ), ( $a_1a_4a_5$ ) y ( $a_1a_5a_6$ ).

8. Finalmente conectar todas las aristas de cada triángulo para todos (n-3) caras (excluyendo aquellas caras i, j, y k) con el ápice,  $C_{ijk}$ . Esto crea un conjunto de tetraedros de los cuales la suma de todos sus volúmenes es el volumen total del poliedro. La ilustración 11 muestra este proceso más explícitamente.



$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
$a_1$	$a_2$	$a_3$			
$a_1$		$a_3$	$a_4$		
$a_1$			$a_4$	$a_5$	
$a_1$				$a_5$	$a_6$

Ilustración 10 Subdivisión de un polígono en triángulos.

Fuente 10 Extraído de (Goodman & Shi, 1985).



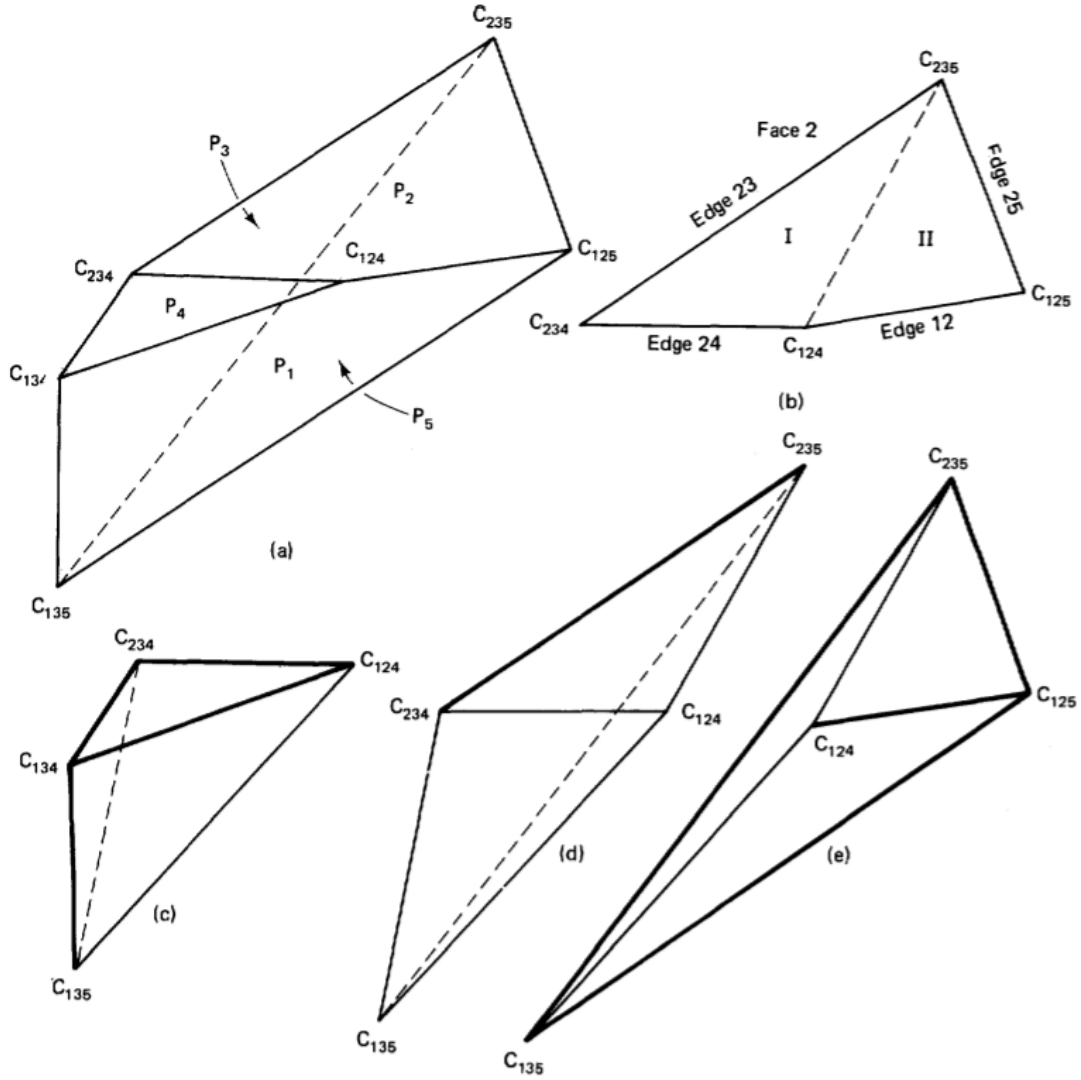


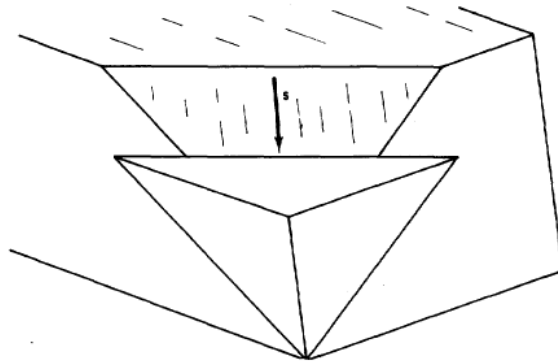
Ilustración 11 Subdivisión de poliedros en tetraedros.

Fuente 11 Extraído de (Goodman & Shi, 1985).

## 2.14 Análisis de cuñas en Fracman

En el software Fracman el análisis de Cuñas consta de 4 etapas.

- 1) En una primera instancia se realiza un rastreo de las intersecciones de los planos de discontinuidad con la superficie de estudio (talud o túnel), identificando bloques y sus caras, los polígonos son generados y sus volúmenes calculados mediante un algoritmo propio del software.
- 2) Se evalúan los criterios de estabilidad para cada bloque encontrado, definiendo de esta manera 3 tipos de estabilidad.
  - Estabilidad incondicional: Se les asigna a aquellos bloques que están en contacto con 3 caras no coplanares o en su defecto si las 3 fuerzas normales de cada cara son positivas.
  - Deslizamiento en un plano (Ilustración 12): el deslizamiento es en el eje de intersección entre las estructuras que se intersecan (discontinuidades).
  - Deslizamiento en 2 planos (Ilustración 13): deslizamiento en 2 caras no paralelas simultáneamente, el deslizamiento es paralelo a la línea de intersección entre los planos de deslizamiento.



*Ilustración 12 Deslizamiento en un plano.*

*Fuente 12 Extraído de (Goodman & Shi, 1985).*

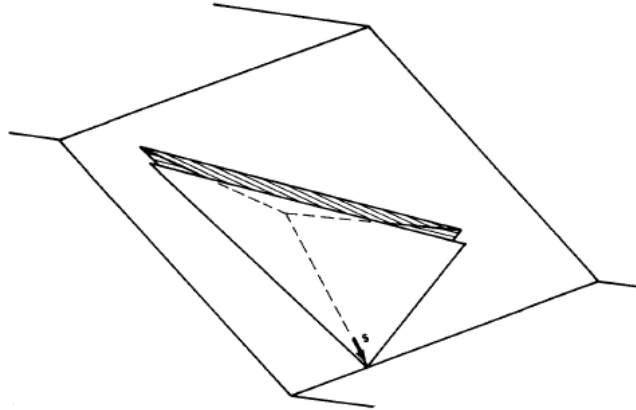


Ilustración 13 Deslizamiento en dos planos.

Fuente 13 Extraído de (Goodman & Shi, 1985).

- 3) Cálculo del Factor de seguridad, La estabilidad de una cuña en Fracman es cuantificada aplicando el Factor de Seguridad, utilizando el criterio de Mohr-Coulomb el cual se define por la siguiente ecuación.

$$FS = \frac{A_1 c_1 + |N'_1| \tan(\phi_1) + A_2 c_2 + |N'_2| \tan(\phi_2)}{S_{12}} \quad (2.27)$$

Donde:

$N'_1$  y  $N'_2$  = Fuerzas normales a las caras 1 y 2 respectivamente.

$A_1$  y  $A_2$  = Áreas de las caras 1 y 2 respectivamente.

$S_{12}$  = Fuerza de cizalle/corte a lo largo del eje de intersección entre las caras 1 y 2

$c_i$  = Cohesión en la cara "i".

$\phi_i$  = Ángulo de fricción en la cara "i".

- 4) Clasificación de estabilidad en cuñas: Posteriormente las cuñas son clasificadas dependiendo de su Factor de seguridad en 3 categorías.

- Free Fall  $FS = 0$
- Unstable  $0 < FS < 1$
- Stable  $FS > 1$

## 2.15 Cálculo de la Variable propuesta Circular Variance “C.V.”

La propuesta de esta memoria consiste en el cálculo de una variable, cuyo valor explique la fragmentación y la estabilidad de una excavación en términos de formación de cuñas, solamente utilizando información proveniente de fuentes de muestreo del tipo unidimensionales, desde estas fuentes de información es posible obtener, al menos 2 ángulos con respecto a cada fractura o plano de discontinuidad detectado.

El procedimiento consta de 3 pasos para el cálculo de la variable propuesta.

1. En primera instancia se considera cada fractura mapeada. Para cada ello de cada plano de discontinuidad “i ... n” Se calculan los vectores normales “ $\vec{x}_i$ ” siguiendo las ecuaciones 2.16, 2.17 y 2.18, importante es que cada vector normal, su norma o módulo debe ser unitario, de esta forma cada discontinuidad posee el mismo peso en el cálculo.

$$D = \sum_i^n \vec{x}_i \quad (2.28)$$

2. Se calcula el módulo del vector Resultante “D”

$$D' = \sqrt{D_x^2 D_y^2 D_z^2} \quad (2.29)$$

3. Finalmente se obtiene la Circular Variance “C.V.” dividiendo la norma o módulo del vector resultante calculado “ D ’ ” este sobre el número de Fracturas de discontinuidades en el registro restado de 1.

$$C.V. = 1 - \frac{|D'|}{n} \quad (2.30)$$

## Estado del arte

Si nos remontamos muy atrás en la historia acerca de cómo el estudio de la competencia de estos macizos rocosos se ha estudiado, podemos encontrarnos que esto se remonta a (Ritter, 1879), quien intentó realizar las primeras clasificaciones de macizos rocosos a través de metodología empírica, metodología que a pesar de ser concluyente, culminó siendo la base de muchas investigaciones que le preceden y que se continúan realizando incluso hasta en la actualidad.

En este apartado se presentan los sistemas de clasificación más importantes durante este último tiempo.

### 2.16 Terzaghi's Rock Mass Classification.

Fue la primera clasificación para el diseño de soporte en túneles (Terzaghi, 1946) en la cual además de designar una calidad para el macizo rocoso también entrega recomendaciones acerca del espaciamiento en la fortificación de pernos a utilizar, esta caracterización se basa en aquellas características del macizo rocoso que dominan el comportamiento de este. Si bien es cierto que muchas de sus hipótesis fueron descartadas con el paso del tiempo, aún en la actualidad utilizamos algunas de las definiciones que él propuso.

Descripciones de Terzaghi:

- *Intact Rock*: no contiene fracturas relevantes ni fracturas pequeñas. Se pueden desprender cuñas, luego de la tronadura, esto puede ocurrir inmediatamente, horas o incluso días luego de esta haber ocurrido, además pueden ocurrir de manera espontánea violentos desprendimientos de losas desde el techo o las paredes de la labor.
- *Stratified Rock*: contiene estratos con poca distancia de separación entre los límites de cada estrato, es muy común tener desprendimientos en este tipo de rocas.

- *Moderately jointed rock*: Contiene discontinuidades y micro fisuras entre discontinuidades, pero los bloques entre discontinuidades que crecen juntos están trabados de manera que las paredes verticales podrían necesitar fortificación lateral. Fenómenos como desprendimiento y fallas tipo cuña son comunes.
- *Blocky and seamy rock*: Es aquella roca intacta (“intact rock”), o fragmentos de esta que están completamente separados uno del otro y trabados de forma imperfecta, en esta roca las paredes verticales requieren fortificación lateral.
- *Crushed but chemically intact rock*: Posee características muy similares a roca de la chancadora, en muchos casos los fragmentos son pequeños y finas arenas.
- *Squeezing rock*: Este tipo de roca avanza lentamente hacia el interior del túnel con un incremento en volumen casi imperceptible, un prerrequisito para el “Squeeze” es un alto contenido de partículas microscópicas y submicroscópicas, o arcilla mineral con poca capacidad para la absorción de agua del terreno (hinchamiento).
- *Swelling rock*: Es aquella roca que avanza principalmente a medida de la expansión del túnel o labor minera. La capacidad de hinchamiento tiende a ser limitada a aquellas rocas que contienen minerales de arcilla como montmorillonite, con gran capacidad de hinchamiento.

## 2.17 Rock quality designation (RQD)

El RQD fue desarrollado por (Deere, Hendron, Patton,, & Cording, 1967) (Deere & Deere, The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, 1988), para proveer de una estimación acerca de la calidad del macizo rocoso con información obtenida a partir de los testigos obtenidos de sondajes del tipo diamantina, RQD es definido como el porcentaje de roca intacta obtenido de los testigos, estas deben ser mayores que 100 mm (4 pulgadas). El diámetro del testigo debe ser de al menos 54.7 mm (2.15 pulgadas de diámetro). El correcto procedimiento para la medición de RQD está resumida en la Ilustración 14 (Deere, 1969) (Deere D. , Rock quality designation (RQD) after 20 years., 1989).

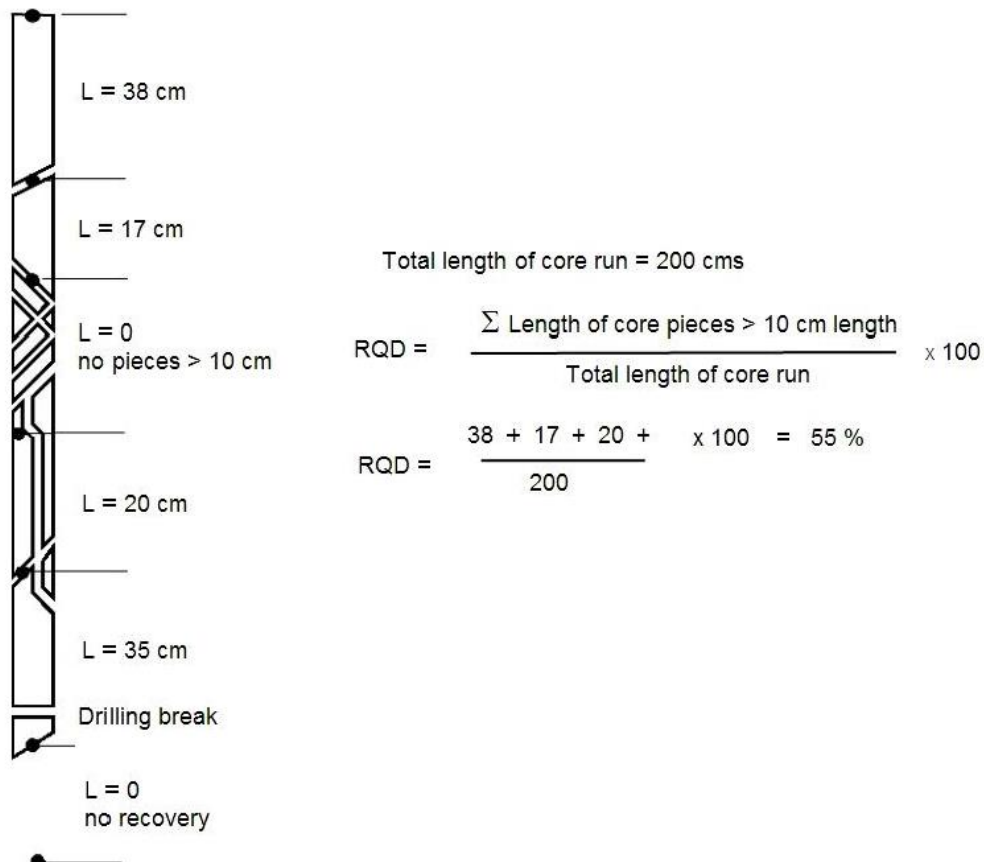


Ilustración 14 Procedimiento para el cálculo del RQD.

Fuente 14 Extraído de (Deere & Deere, The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, 1988)

Palmström (Palmström, The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock jointing, 1982) sugiere que, en la ausencia de testigos pero si, planos de discontinuidades son apreciados en la superficie de las exploraciones, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen, para macizos libres de arcillas se sugiere la siguiente ecuación.

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (2.31)$$

En donde “ $J_v$ ” es la sumatoria del número de discontinuidades por unidad de largo.

RQD es un parámetro dependiente direccionalmente y su valor puede cambiar significativamente dependiendo de la orientación del sondaje, el uso de volumetric joint count ( $J_v$ ) (Palmström, Block size & Block size distribution., 2000) puede resultar muy útil para reducir la dependencia direccional.

La intención de RQD es la de representar la calidad del macizo rocoso en el terreno, cuando se utiliza sondaje del tipo diamantina, sin embargo, mucho cuidado se debe tener pues, muchas fracturas pueden ser formadas por la manipulación de los testigos, o durante el proceso de perforación.

El RQD de Deere ha sido ampliamente usado, particularmente en Norte América luego de su introducción Merritt (Merritt, 1972) y Deere (Deere, Hendron, Patton., & Cording, 1967) intentan relacionar RQD con los Trabajos de Terzaghi para el uso de pernos en túneles.

## 2.18 Rock Structure Rating (RSR)

(Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972) Describieron un método cuantitativo para describir la calidad de un macizo rocoso y además entregar un soporte apropiado en base al valor calculado con su propuesta “Rock Structure Rating” (RSR).

La mayoría de los casos, usados para el desarrollo de este sistema, son túneles relativamente pequeños sostenidos con fortificación generalmente del tipo perno, a pesar



de que históricamente este sistema fue uno de los primeros en hacer referencia al uso de Shotcrete, para la fortificación, solo proporciona recomendaciones para el uso de pernos, incluso con estas limitaciones, la importancia de RSR es que con algunos pormenores demuestra la lógica, involucrada en desarrollar un método de clasificación de macizos rocosos cuasi-cuantitativo.

La importancia del sistema RSR en el contexto del desarrollo de métodos de clasificación, es que introduce el concepto de “rating”.

A continuación, se muestra el procedimiento de cálculo de RSR. A cada una de las siguientes componentes, se le asigna un puntaje (“rating”) en base a datos empíricos, lo que permite asignarle un valor numérico a la condición del macizo rocoso.

$$RSR = A + B + C. \quad (2.32)$$

Los tres parámetros son descritos a continuación y posterior a ello, se muestran tres tablas extraídas de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972), que permiten su respectivo cálculo/puntuación.

- 1) Parámetro A (Tabla 2), Geología: evaluación general de la estructura geológica para la roca de acuerdo con:
  - a) Tipo de origen de la roca: (ígneas, Metamórficas, Sedimentarias).
  - b) Dureza de la Roca de mayor a menor dureza.
  - c) Estructura geológica.

Tabla 2 Parámetro "A". Extraído de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972).

	Basic Rock Type				Geological Structure			
	Hard	Medium	Soft	Decomposed				
Igneous	1	2	3	4		Slightly	Moderately	Intensively
Metamorphic	1	2	3	4		Folded or	Folded or	Folded or
Sedimentary	2	3	4	4	Massive	Faulted	Faulted	Faulted
Type 1					30	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

- 2) Parámetro B (Tabla 3), Geometría: efectos de los patrones de discontinuidad con respecto a la dirección del túnel de acuerdo a.
- Joint spacing (espaciamiento entre discontinuidades).
  - Joint orientation (Rumbo y manteo).
  - Direction of tunnel drive (Dirección de la excavación).

Tabla 3 Parámetro "B" Extraído de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972).

	Strike $\perp$ to Axis					Strike $\parallel$ to Axis		
	Direction of Drive					Direction of Drive		
	Both	With Dip		Against Dip		Either direction		
Average joint spacing	Dip of Prominent Joints <sup>a</sup>					Dip of Prominent Joints		
	Flat	Dipping	Vertical	Dipping	Vertical	Flat	Dipping	Vertical
1. Very closely jointed, < 2 in	9	11	13	10	12	9	9	7
2. Closely jointed, 2-6 in	13	16	19	15	17	14	14	11
3. Moderately jointed, 6-12 in	23	24	28	19	22	23	23	19
4. Moderate to blocky, 1-2 ft	30	32	36	25	28	30	28	24
5. Blocky to massive, 2-4 ft	36	38	40	33	35	36	24	28
6. Massive, > 4 ft	40	43	45	37	40	40	38	34

- 3) Parámetro C (Tabla 4), Efecto del flujo de agua subterránea y la condición de las discontinuidades de acuerdo a.
- Sum of Parameters A+B (Suma de los parámetros A y B).
  - Joint condition (Buena, regular o pobre).
  - Amount of water inflow (en galones por minuto, para cada 1000 pies de túnel).

Tabla 4 Parámetro "C" Extraído de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972).

Anticipated water inflow gpm/1000 ft of tunnel	Sum of Parameters A + B					
	13 - 44			45 - 75		
	Joint Condition <sup>b</sup>					
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None	22	18	12	25	22	18
Slight, < 200 gpm	19	15	9	23	19	14
Moderate, 200-1000 gpm	15	22	7	21	16	12
Heavy, > 1000 gp	10	8	6	18	14	10

Es con estos 3 parámetros que se puede obtener un valor numérico acerca de la calidad del macizo rocoso (RSR), y es con este valor que se procede finalmente a determinar la fortificación a utilizar (ver ilustración 10).

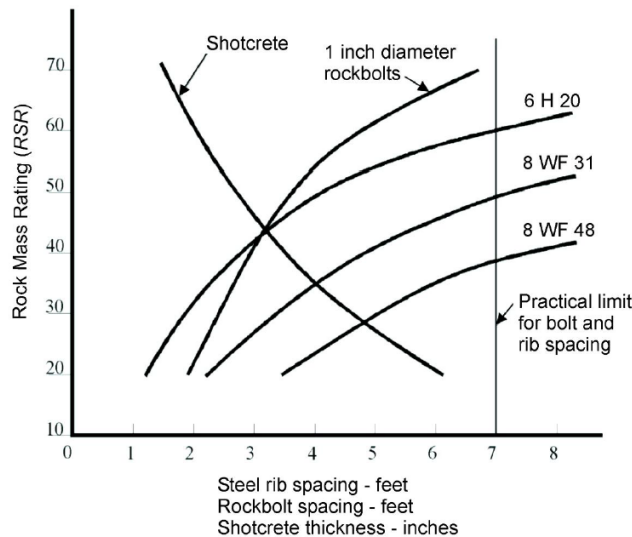


Ilustración 15 Selección de fortificación.

Fuente 15 Extraído de (Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, 1972).

La importancia de esta clasificación es que nos demuestra el procedimiento elemental en la caracterización de macizos rocosos, es decir, como poder convertir un macizo rocoso, sus resistencias y características, a un material de ingeniería.

## 2.19 Clasificación Geomecánica (RMR)

Publicada por el Profesor Bieniawski (Bieniawski, Rock mass classification in rock engineering, 1976), es un trabajo de muchos años de estudio a través investigaciones y resultados empíricos fue posible entregar una caracterización numérica, basada en asignar puntajes a cada parámetro del macizo rocoso, luego de la discusión que hubo en (Bieniawski, Engineering rock mass classifications., 1989) se decretó que es posible el cálculo de esta clasificación (También conocida como RMR) a partir de los siguientes 6 parámetros.

1. Resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso (UCS).
2. *Rock Quality Designation* (RQD).
3. Espaciamiento de las discontinuidades.
4. Condición de las discontinuidades.
5. Condición de agua subterránea.
6. Orientación de las discontinuidades.

Durante la aplicación de esta técnica, es importante mencionar que debido a la variabilidad que pueda presentar un macizo rocoso se recomienda, la división de la región a estudiar, y cada una de estas divisiones debe ser clasificada de manera separada, esto pues significativos cambios pueden existir dentro de diferentes regiones y cada una puede o no requerir un tratamiento distinto de acuerdo a sus particularidades (Bieniawski, Determining Rock Mass Deformability Experience from Case Histories., 1978).

Para el cálculo de cada uno de los 6 parámetros nombrados anteriormente, el Dr. Bieniawski le asigna un valor a cada uno de ellos y la suma de estos 6 valores nos permite calcular el RMR, a continuación, en Tabla 5 se presenta el procedimiento para asignar a cada uno de estos parámetros un respectivo valor, de acuerdo con las observaciones que sean realizadas en terreno, y considerando además los ensayos de laboratorio para el valor de UCS (Primero de los 6 parámetros).

Por otra parte, esta clasificación entrega además pautas para la excavación y fortificación de túneles cuyo avance sea de 10m, ver Tabla 6.

Tabla 5 Clasificación geomecánica RMR, Extraído de (Bienawski 1989)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter		Range of values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
		Rating	20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
		Rating	20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
		Rating	30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal $\sigma$ )	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating	15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable			
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12			
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25			
	Slopes	0	-5	-25	-50				
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating	100 ← 81		80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Class number	I		II	III	IV	V			
Description	Very good rock		Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number	I		II	III	IV	V			
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span		1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span			
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400		300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100			
Friction angle of rock mass (deg)	> 45		35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15			
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)	< 1 m		1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
Rating	6		4	2	1	0			
Separation (aperture)	None		< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
Rating	6		5	4	1	0			
Roughness	Very rough		Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided			
Rating	6		5	3	1	0			
Infilling (gouge)	None		Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm			
Rating	6		4	2	2	0			
Weathering	Unweathered		Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed			
Rating	6		5	3	1	0			
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis					
Drive with dip - Dip 45 - 90°		Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°			
Very favourable		Favourable		Very unfavourable		Fair			
Drive against dip - Dip 45-90°		Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°					
Fair		Unfavourable		Fair					

Tabla 6 Pautas para la excavación y fortificación para túneles de 10m de avance de acuerdo con RMR, Extraído de (Bienawski 1989)

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR: 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock RMR: 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

## 2.20 Clasificación Q de Barton para macizos rocosos

En base a numerosos casos de excavaciones subterráneas (Barton, Loset, Lien, & Lunde, 1974) y el instituto Noruego de Geotecnia proponen el índice de calidad tunelera (Q) (también conocido como Q de Barton), este valor varía en escala logarítmica entre valores de 0.001 a un máximo de 1000 y está definido por la siguiente ecuación

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2.33)$$

En donde:

- RQD es *Rock Quality Designation*.
- $J_n$  es el Número de discontinuidades.
- $J_r$  es el número de aspereza de las discontinuidades (*roughness*).
- $J_a$  es la alteración de las discontinuidades
- $J_w$  es el factor de reducción por presencia agua en las discontinuidades.
- SRF es el factor de reducción de Esfuerzos.

Para explicar el significado de cada uno de los parámetros utilizados para determinar el valor de Q. (Barton, Loset, Lien, & Lunde, 1974) Enlista los siguientes comentarios.

Primer Cociente ( $RQD/J_n$ ) Representa la estructura del macizo rocoso. Es una cruda aproximación del bloque o el tamaño de partícula, con valores extremos de 0.5 cm hasta 200 cm, lo cual se aleja mucho de la realidad en algunos casos muy particulares.

Segundo Cociente ( $J_r/J_a$ ) Representa la aspereza y las características friccionales de las discontinuidades en las paredes o los materiales de rellenos. Este parámetro está ponderado en favor de la aspereza ( $J_r$ ), por lo cual, en minerales con relleno de fallas del tipo arcilloso, se espera que esta resistencia se vea reducida significativamente.

Tercer Cociente ( $J_w/SRF$ ) consiste en 2 parámetros de Esfuerzos, SRF es una medida de lo aflojado que puede estar la carga en una excavación en zonas de cizalla, el parámetro  $J_w$  es una medida de la presión de agua, que puede contribuir negativamente respecto de la reducción por la cizalla, (el cociente  $J_w/SRF$  es un factor empírico complicado que describe el “esfuerzo activo”).

Aparentemente los factores que describen a Q se pueden resumir en una función de solo 3 parámetros.

- |   |               |
|---|---------------|
| 1. Tamaño de bloque                     | ( $RQD/J_n$ ) |
| 2. Resistencia el Cizalle entre Bloques | ( $J_r/J_a$ ) |
| 3. Esfuerzos Activos                    | ( $J_w/SRF$ ) |

De igual manera que Bieniawski (Bieniawski, Engineering rock mass classifications., 1989) Barton también otorga hojas de cálculo para asignar valores a sus parámetros, y con base a estos nos proporciona pautas para determinar la fortificación a utilizar, Estas hojas y recomendaciones pueden ser encontradas en (Barton & Grimstad, Updating the Q-System for NMT., 1993).

## 2.21 Clasificación R<sub>Mi</sub> para macizos rocosos

El Rock mass index (R<sub>Mi</sub>) fue presentado en un inicio por Arild Palmström en (Palmström, R<sub>Mi</sub> – a rock mass characterization system for rock engineering purposes., 1995), y ha sido desarrollado con el paso del tiempo en numerosos artículos de revista. Es un parámetro volumétrico, que indica un aproximado de la resistencia a la carga uniaxial de un macizo rocoso, por lo cual puede ser comparado con GSI (Marinos, Marinos, & Hoek., 2004) , El valor obtenido a partir de R<sub>Mi</sub> puede ser utilizado como un input (entrada) para la estimación de fortificación y también como input en otros métodos de ingeniería (Palmström, The Rock Mass index (R<sub>Mi</sub>) applied in rock mechanics and engineering, 1996).

R<sub>Mi</sub> tiene algunos parámetros en común con otros métodos de caracterización como lo es Q de Barton (Barton, Loset, Lien, & Lunde, 1974), por lo que muchos factores de acuerdo con el grado de fragmentación, tipos de Joint y grado de Jointing son casi los mismos. El input de estos parámetros es determinado comúnmente en el terreno mediante observaciones y mediciones.

R<sub>Mi</sub> Requiere más cálculos que los métodos RMR y Q de Barton, no obstante, existen hojas de cálculos que han sido desarrolladas por su autor, que permiten calcular el R<sub>Mi</sub> y además entregar consejos acerca de la fortificación a implementar.

En macizos rocosos fracturados se hace uso de la compresión uniaxial ( $\sigma_c$ ) y la reducción que esta sufre debido al efecto de las joints (discontinuidades) que penetran el macizo rocoso, lo anterior se describe en la siguiente ecuación

$$R_{Mi} = \sigma_c \times JP \quad (2.34)$$

En donde

$\sigma_c$  = Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

JP = parámetro de fracturamiento (jointing parameter), este involucra relaciones empíricas para combinar la condición de las joint (discontinuidades), y el V<sub>b</sub> (Volumen de bloque).



En la siguiente ecuación exponencial obtenida de ensayos de esfuerzos en numerosos macizos fracturados, se muestra el Cálculo de JP y del valor D.

$$JP = 0.2\sqrt{jC}x Vb^D \quad (D = 0.37jC^{-0.2}) \quad (2.35)$$

En donde

- Vb = Volumen del bloque en m<sup>3</sup>, su cálculo puede ser encontrado en (Palmström, Block size & Block size distribution., 2000)
- $jC = jR \times jL/jA$

jR = Aspereza en discontinuidades.

jA = Alteración en discontinuidades.

jL = Largo de la discontinuidad.

Estos últimos 3 son posibles de obtener en terreno aplicando lo que se establece según (International society for Rock mechanics, 1978) y representan gran parte de las características que puede tener una discontinuidad.

Para macizos rocosos en donde las discontinuidades tienen poca influencia en la resistencia, se explica que:

$$RMi = \sigma_c \times f_\sigma \text{ (En casos donde } f_\sigma > JP). \quad (2.36)$$

Donde

$f_\sigma$  = Es llamado parámetro de masividad y es calculado a partir de

$$f_\sigma = \left(\frac{0.05}{Db}\right)^{0.2} \quad (2.37)$$

(Db = Diámetro de Bloque). En mayoría de los casos  $f_\sigma \approx 0.5$

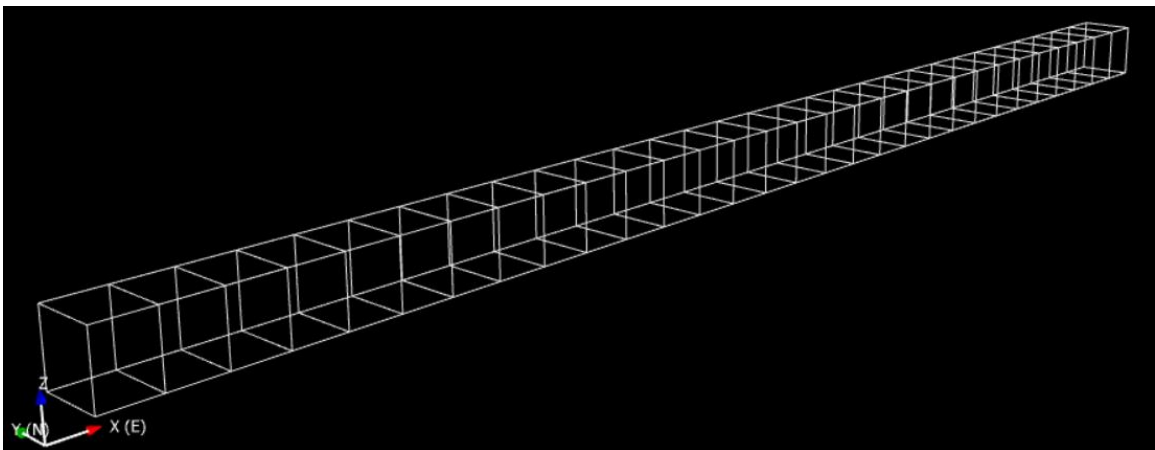
Como el RMi solo caracteriza la resistencia (*strength*) del macizo rocoso del material en seco, no considera por lo tanto influencia por esfuerzos ni los efectos de aguas subterráneas (Palmström, Characterizing the strength of rock masses for use in design of underground structures, 1995).

## Capítulo 3 Metodología, Simulación de redes de fracturas y mapeo.

Este capítulo contempla y explica las etapas que fueron realizadas para el estudio del método que permite estimar estabilidad y fragmentación, en base a las orientaciones de fracturas mapeadas.

Como se mencionó con anterioridad el software utilizado para el estudio es Fracman® perteneciente a Golder Associates, en él se realizó un diseño con las características que se enlistan a continuación.

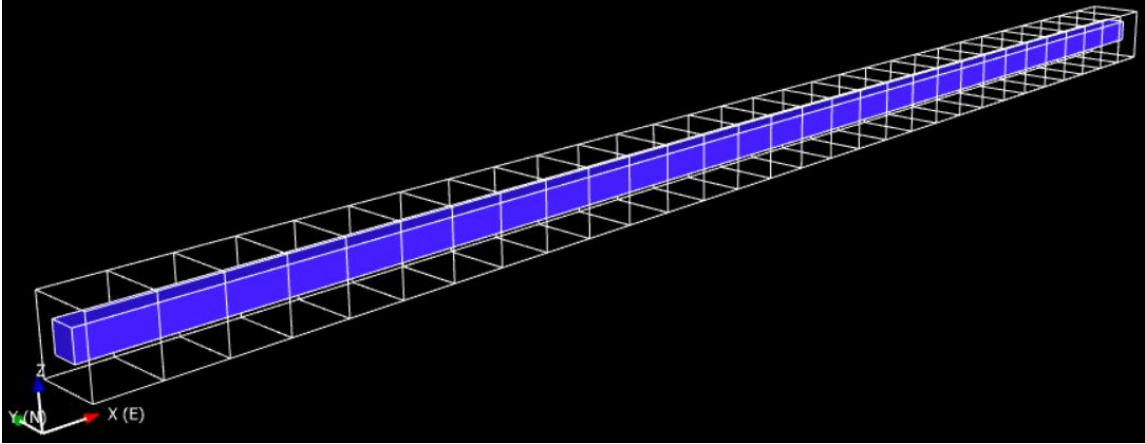
- 30 regiones de 8x10x10m cada una, en la dirección este (eje x) lo cual representa ser el macizo rocoso y la región externa a la excavación, tal como se aprecia en la siguiente ilustración.



*Ilustración 16 Diseño de Regiones en Fracman*

*Fuente 16 Elaboración Propia.*

- Luego se simuló una excavación de 8x4x4m en el centro de las regiones creadas, esto se realizó 30 veces simulando ser una excavación con orientación oeste-este, al interior de las regiones (macizo rocoso) ya mencionadas tal como se muestra en la siguiente Ilustración.



*Ilustración 17 Simulación de excavaciones.*

*Fuente 17 Elaboración propia.*

Para la simulación de redes de fracturas es necesario al menos contar con información de:

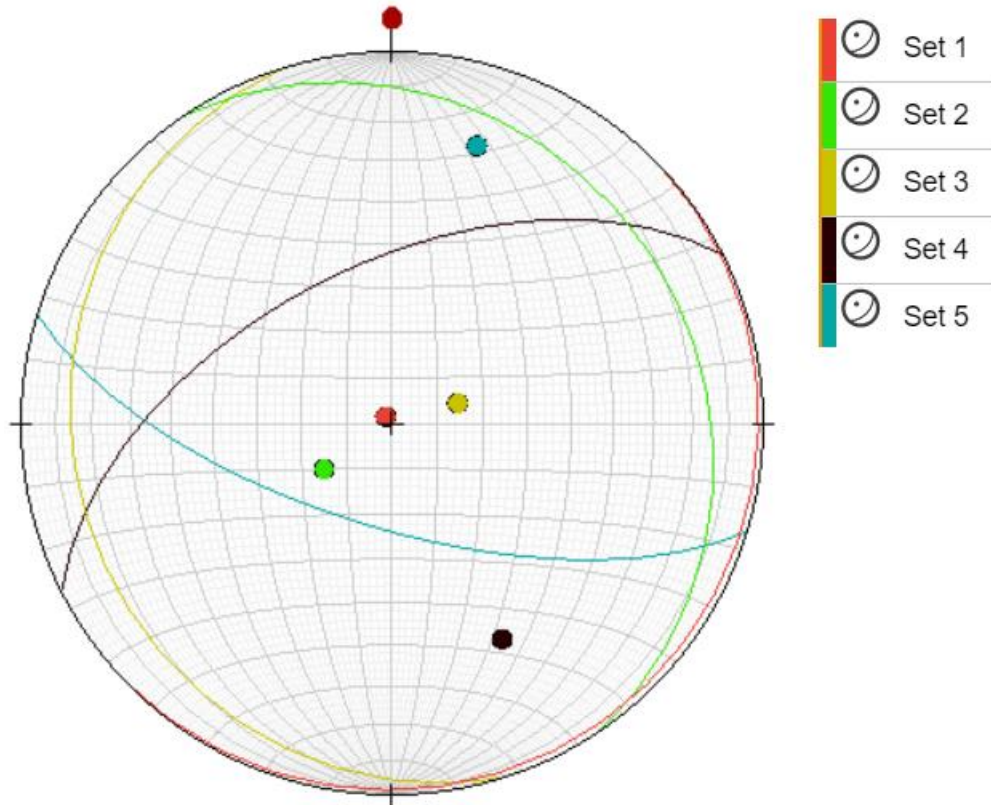
- Orientación de las fracturas.
- Tamaño de fracturas.
- Intensidad de Fracturamiento.

### **3.1 Simulación de la orientación en el modelo estocástico**

La simulación de orientaciones de las fracturas en el modelo fue realizada en base a modelamiento estocástico de fracturas con las siguientes orientaciones.

*Tabla 7 Orientaciones de Sets estructurales, Fuente: Elaboración propia.*

Set	Strike	Dip
1	46	2
2	326	18
3	163	15
4	243	55
5	107	67

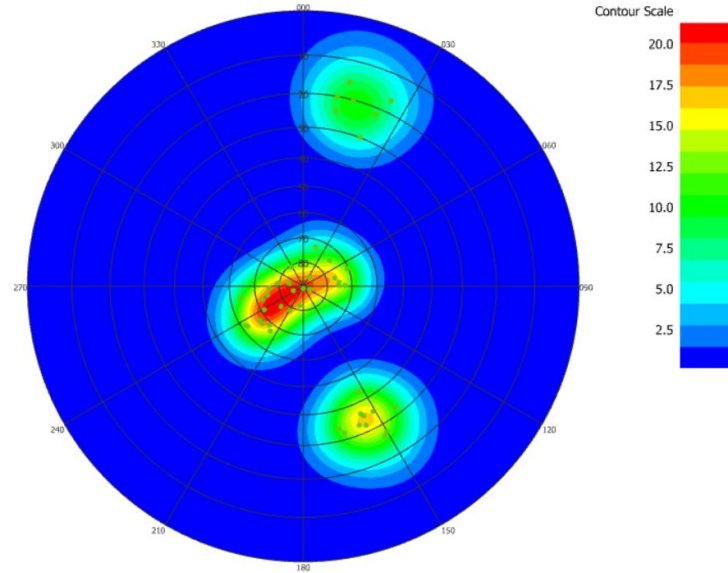


*Ilustración 18 Representación en red estereográfica de los sets estructurales.*

*Fuente 18 Elaboración propia.*

Se utilizó una distribución del tipo Fisher con un parámetro “k” de dispersión elevado de (100) con la finalidad de no variar las direcciones de los sets obtenidos.

A continuación, se muestra una de las redes estereográficas simuladas (en la sección Anexo A se muestran todas las redes estereográficas simuladas) para una región cuyo  $P32$  es  $\frac{1}{m}$ . En la cual es posible apreciar que los polos de las estructuras mapeadas concuerdan con los simulados.



*Ilustración 19 Red estereográfica primera simulación.*

*Fuente 19 Elaboración propia.*

Las simulaciones de los sets de discontinuidades se realizaron sustrayendo un set en cada región, de manera que fuese posible hacer también un estudio de la influencia del número de sets en la formación de bloques. Lo anterior es posible de apreciar en la siguiente ilustración, en donde se mantuvo un valor de Intensidad de fracturas (P32) constante de 1 para cada región. Cada región cuenta con un set estructural menos que la anterior. (Los colores indican pertenencia a un mismo set estructural).

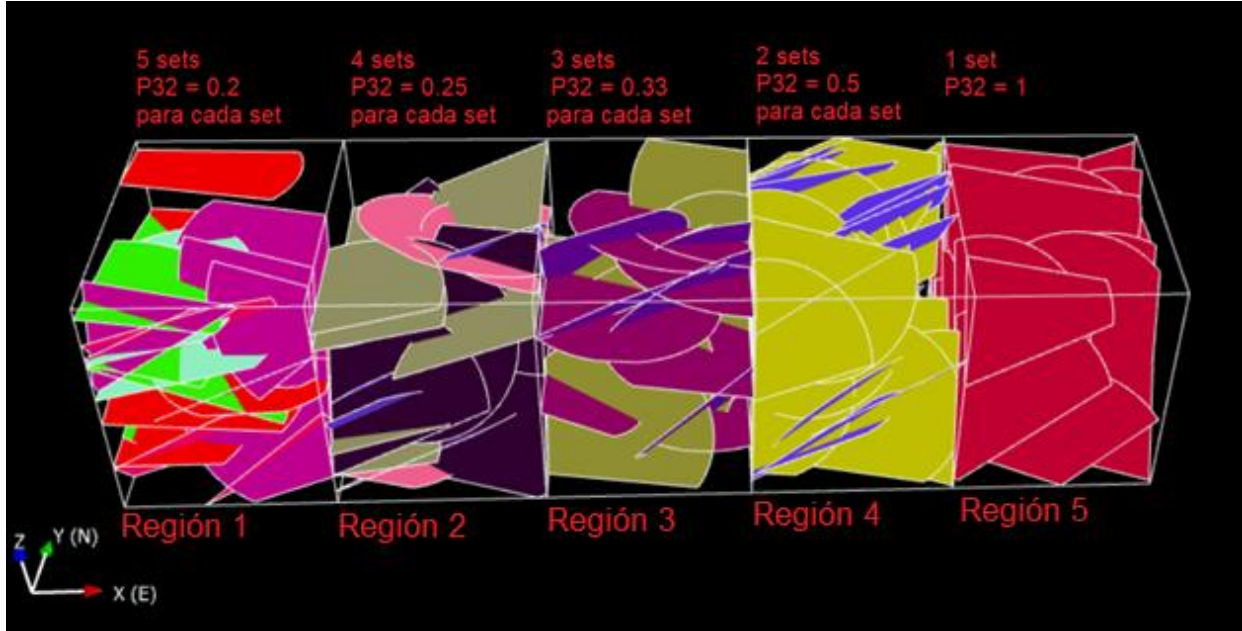


Ilustración 20 Esquema explicativo de las realizaciones direccionales para el estudio

Fuente 20 Elaboración propia

La sustracción de sets también es explicada en la siguiente tabla, en la cual es posible apreciar que para cada una de las regiones se mantuvo constante el valor de intensidad de fracturas (P32) a la vez que se sustrajo un set consecutivamente.

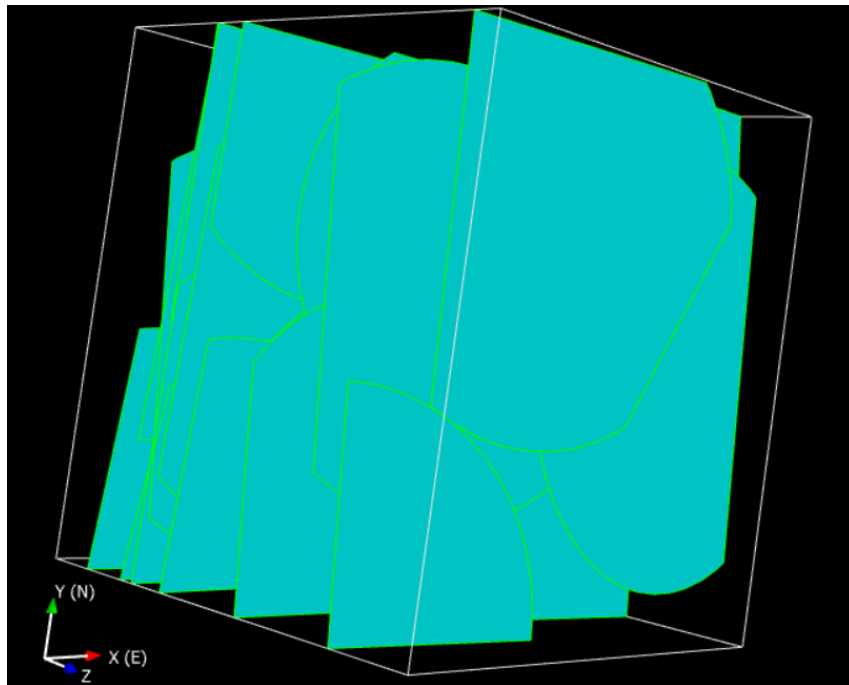
Tabla 8 Sustracción de sets y respectivo P32, Fuente: Elaboración propia

Región	Sets	P32	P32 total
Región 1	set 1	0.2	1
	set 2	0.2	
	set 3	0.2	
	set 4	0.2	
	set 5	0.2	
Región 2	set 1	0.25	1
	set 2	0.25	
	set 3	0.25	
	set 4	0.25	
Región 3	set 1	0.33	1
	set 2	0.33	
	set 3	0.33	
Región 4	set 1	0.5	1
	set 2	0.5	
Región 5	set 1	1	1

### 3.2 Simulación del tamaño en el modelo estocástico

El tamaño de las fracturas es un tema complejo, del cual en esta ocasión se contaba con información previa, los cuales determinaron que la distribución de tamaño es del tipo Log normal con media 4 metros (simulación de radio equivalente de las fracturas). Forma, la forma de las fracturas se designó por discos planares para facilitar los cálculos y esto si bien es una simplificación resulta ser una aproximación cercana a la realidad que muchos autores señalan como aceptable (Dershowitz & Einstein, 1988) (Elmo, Stead, & Rogers, Guidelines for the quantitative description of discontinuities for use in discrete fracture network engineering., 2015).

A continuación, se muestran simulaciones en las cuales es posible apreciar el tamaño de fracturas y la forma de estas al interior de una de las regiones simuladas.



*Ilustración 21 DFN en una región cuyo P32 es 1 y su tamaño en base a distribución log normal de media 4.*

*Fuente 21 Elaboración propia.*



### 3.3 Simulación de la intensidad en el modelo.

La intensidad de las fracturas es un parámetro clave para terminar de definir completamente un DFN, para este estudio se trabajó con la unidad de medida P32 definida por (Dershowitz & Herda, 1992) (Dershowitz, y otros, 2004), valor que no es posible de medir en el terreno y existen diversas metodologías para estimarlo en base a sondajes o en mapeos de galerías (Chilès, Wackernagel, Beucher, Lantuéjoul, & Élion, 2008) (Hekmatnejad, 2018), dada la naturaleza de la investigación se trabajó con valores de P32 arbitrarios de  $\frac{1}{m}$ ,  $\frac{2}{m}$ ,  $\frac{3}{m}$ ,  $\frac{4}{m}$ ,  $\frac{5}{m}$  y  $\frac{7}{m}$ .

La siguiente Ilustración, muestra el efecto que tienen los valores de intensidad de fracturas P32 mencionados anteriormente en el modelamiento de un mismo set estructural.

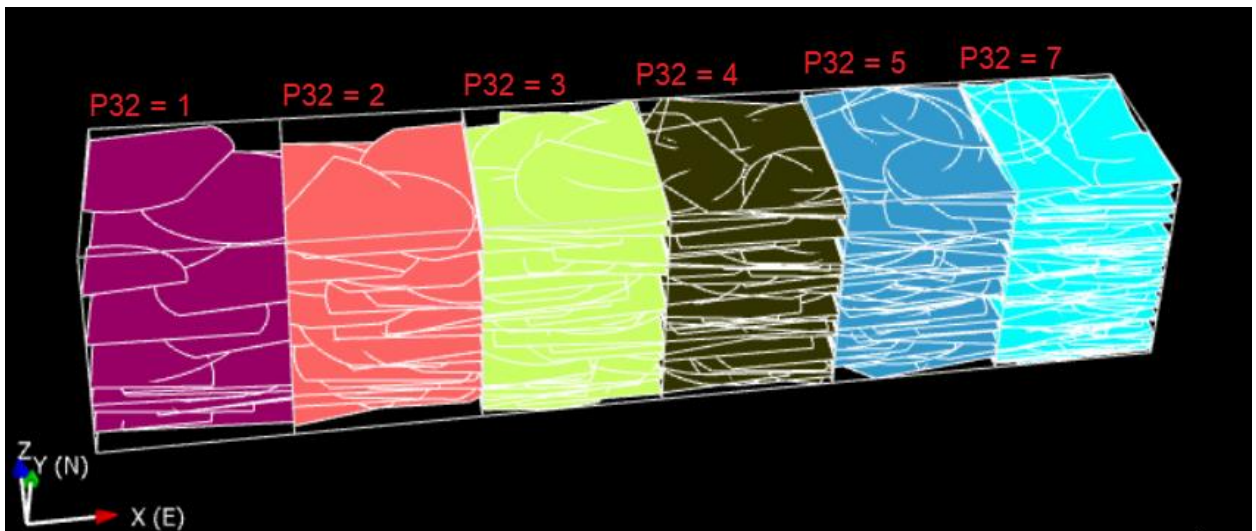


Ilustración 22 Simulación de DFNs generados en base a un set estructural variando el valor de P32

Fuente 22 Elaboración propia.

### 3.4 Logging simulado

El Logging simulado es una técnica de registro de información que representa el tipo de muestreo unidimensional en terreno. En el contexto de esta memoria se utilizó además para obtener la información necesaria el cálculo de la variable C.V. propuesta, el procedimiento necesario para realizar este registro se explica a continuación.



Una vez simulados los DFNs se realizaron pozos o líneas en la excavación simulando lo que en terreno podrían ser scanlines o sondajes, 3 de estas fueron realizadas y la disposición de ellas en la excavación es paralela a cada eje cartesiano y justo en el centro de la excavación

En la siguiente ilustración es posible apreciar la disposición de las scanlines en el centro de una de las excavaciones simuladas, la cual está representada de color amarillo, y las scanlines en cada dirección por líneas blancas.

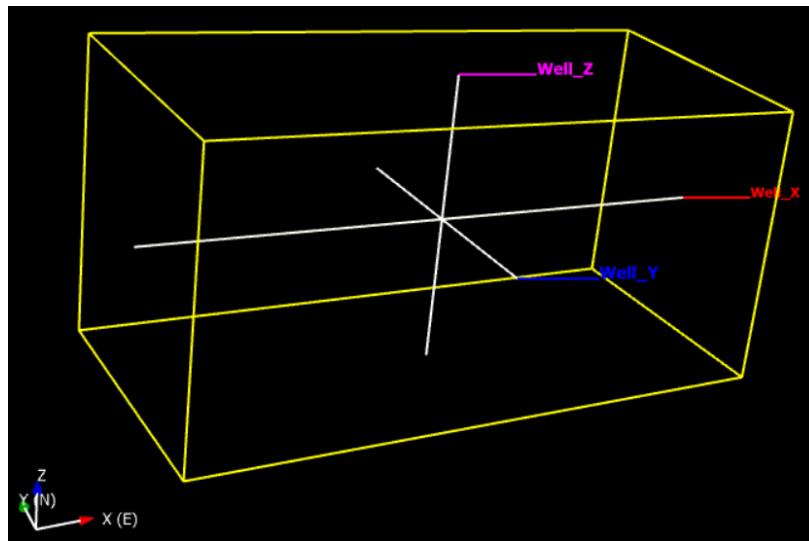


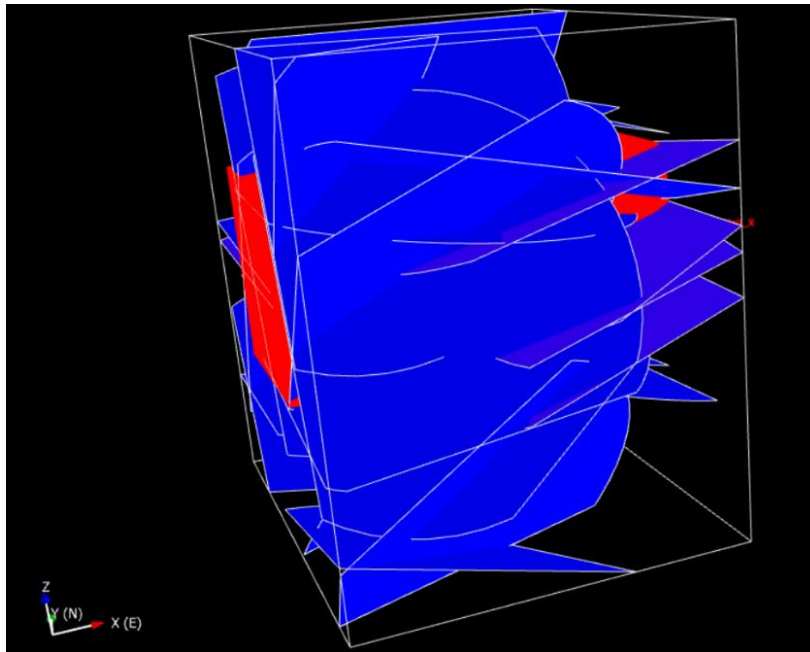
Ilustración 23 Disposición de scanlines en una excavación simulada

Fuente 23 Elaboración propia.

Son estas scanlines que intersecan el DFN simulado de las que se obtuvo el registro de información de las fracturas o “logging” el cual fue utilizado para el cálculo de los valores de intensidad de fracturas y C.V.

Las siguientes ilustraciones 24 y 25 muestran respectivamente, un modelo DFN con un túnel cuadrado de frente 4x4m el cual en su interior posee las 3 scanlines ya mencionadas, y la siguiente ilustración muestra el registro de fracturas para dicho DFN, en dicho registro solo es posible extraer información acerca de las orientaciones y posiciones de las fracturas que interseca cada scanline respectivamente, por temas explicativos se les designó un mismo radio a todas las fracturas detectadas, como se mencionó anteriormente el tamaño de las fracturas es un tema complejo el cual además no forma parte de los objetivos de esta memoria.

El objetivo de esta última ilustración también es exponer el efecto que tiene la C.V de mapeo o registro en el proceso de captura de información en terreno, debido a que la naturaleza intrínseca de las fracturas permite que la intersección sea más probable si el ángulo entre la línea de mapeo y la estructura es cercano a  $90^\circ$  lo cual resulta independiente del largo de la scanline, en esta imagen se aprecia claramente como la naturaleza de los sets de fracturas simulados tiende a ser más fácil de registrar en la dirección vertical o “eje Z”



*Ilustración 24 Simulación DFN en una región de 10x10x8m con 5 sets estructurales  
Fuente 24 Elaboración propia*

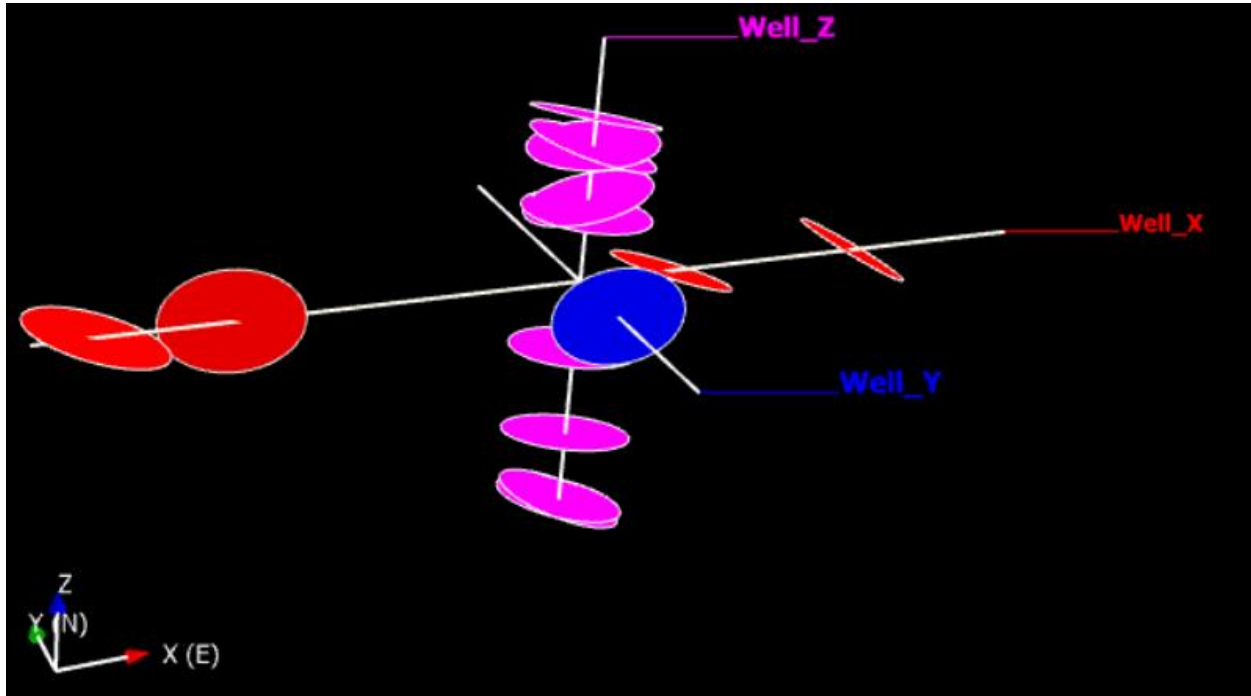


Ilustración 25 Esquema explicativo, Logging de fracturas.  
Fuente 25 Elaboración propia.

### 3.5 Modelo experimental final.

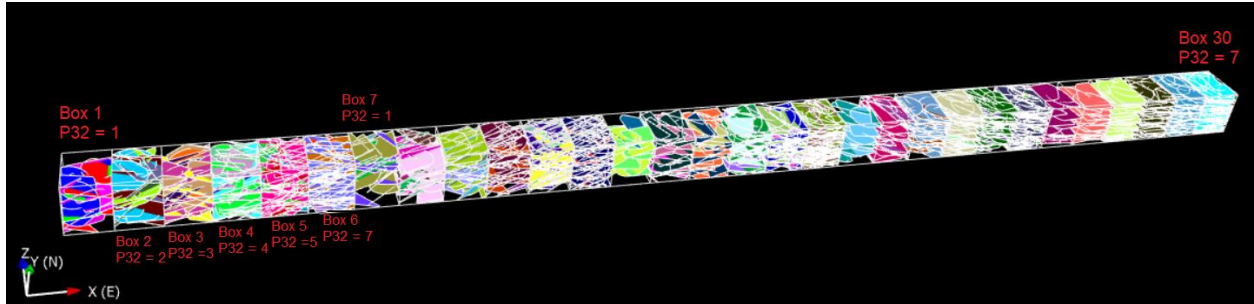
Finalmente, estos experimentos fueron realizados para 30 regiones variando los valores de P32 y el número de sets tal y como se mencionó en los apartados anteriores.

En la siguiente tabla se exponen las 30 regiones simuladas con las respectivas discontinuidades que cada uno presenta y el valor de P32 que fue simulado para ellas.

Tabla 9 Esquema general del modelo experimental.

Box's number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
P32	1	2	3	4	5	7	1	2	3	4	5	7	1	2	3	4	5	7	1	2	3	4	5	7	1	2	3	4	5	7	
Número de sets	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1

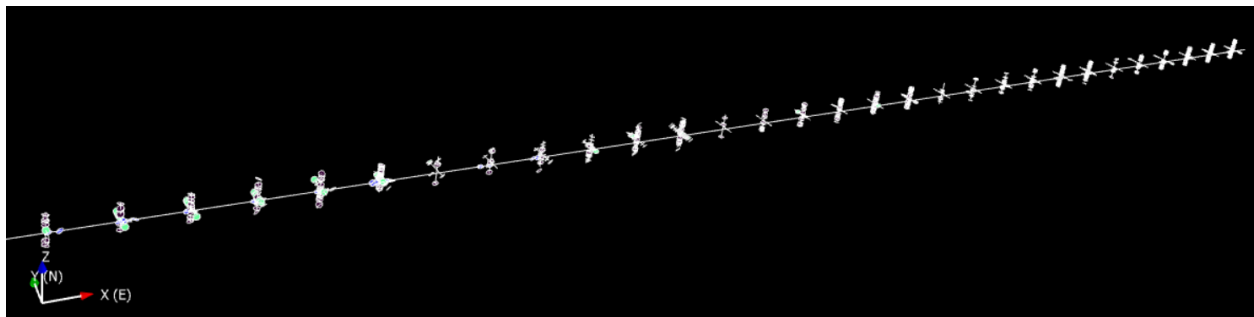
La siguiente ilustración muestra el modelo experimental final con todos los DFN creados para las 30 regiones (con el nombre de Box en la Ilustración) mencionadas y siguiendo el procedimiento ya explicado.



*Ilustración 26 Primera simulación del modelo experimental.*

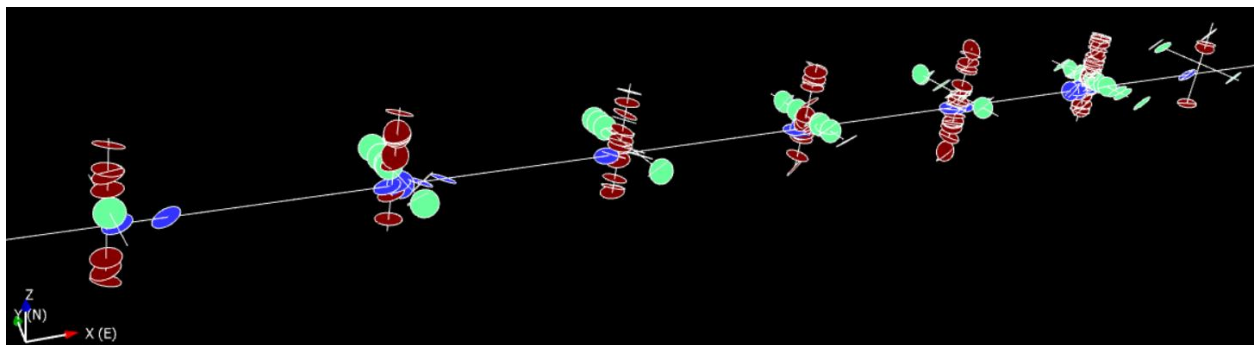
*Fuente 26 Elaboración propia.*

A continuación, se muestran 2 imágenes que exponen la captura de información mediante las scanlines simuladas en los modelos. La ilustración 27 muestra el muestreo para toda la modelación y la ilustración 28 muestra un acercamiento a este muestreo en las 7 primeras scanlines simuladas, esto último fue realizado para temas explicativos



*Ilustración 27 Registro de fracturas con scanlines en X, Y & Z del modelo simulado.*

*Fuente 27 Elaboración propia.*



*Ilustración 28 Primeros 7 registros de fracturas con scanlines en X, Y & Z.*

*Fuente 28 Elaboración propia.*

## Capítulo 4 Resultados experimentales y parámetros calculados

En este capítulo se muestran los resultados del experimento anteriormente descrito, además se muestran los resultados de los cálculos realizados respecto del parámetro de C.V. e intensidad y sus relaciones tanto con la fragmentación como la formación de cuñas.

### 4.1 Resultados del modelo experimental

Una vez simulados los DFNs para las 30 regiones con las características mencionadas anteriormente se realizaron 2 tipos de análisis, el primero de “Block size” o tamaño de bloques (fragmentación), y luego de formación de cuñas alrededor de la excavación simulada en base a cuñas o “Wedge analysis”, en esta sección se muestran resultados explicativos de algunas de las regiones simuladas.

La siguiente ilustración muestra el resultado de un estudio de “Block size” la cual expone el efecto que tiene el número de sets estructurales en regiones con un mismo valor de P32 variando solamente el número de sets, cada color representa un bloque o un fragmento distinto, de izquierda a derecha se muestran regiones simuladas, en cada una de ellas se simularon respectivamente con 5, 4, ... 1 sets estructurales.

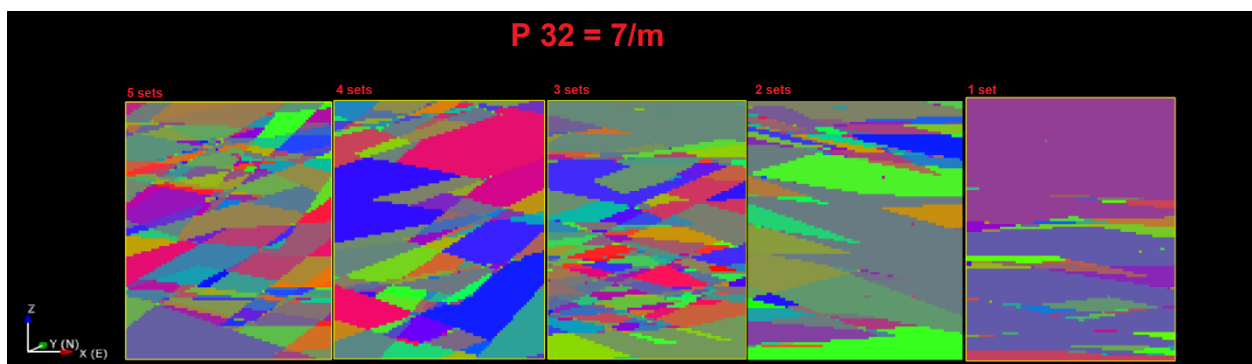


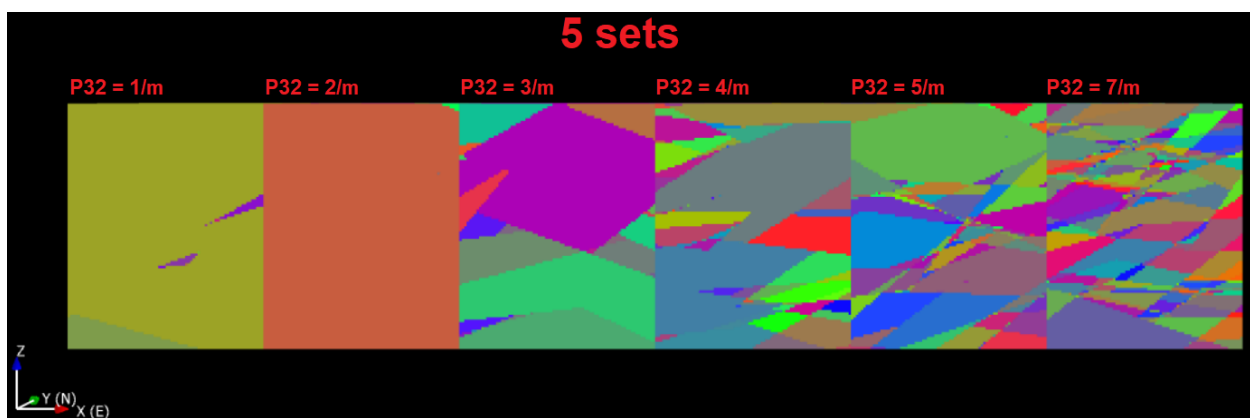
Ilustración 29 Efecto del número de sets en la fragmentación

Fuente 29 Elaboración propia

La imagen anterior respalda la hipótesis que se planteó respecto del efecto que tiene la orientación en la fragmentación, dicho en otras palabras, en aquellos lugares con

fracturas de múltiples direcciones (5 sets) se aprecia una fragmentación más uniforme y de menor tamaño que en los lugares donde las fracturas tienen una orientación similar (1 set), donde se aprecian bloques muy grandes y una fragmentación muy variada (región de la derecha en la Ilustración anterior).

De manera análoga a continuación se muestra una ilustración en la que es posible apreciar el efecto que tiene la intensidad de fracturas, manteniendo constante el número de sets simulados (5 sets estructurales simulados), cada color indica un bloque generado por la intersección de las fracturas simuladas en el DFN.



*Ilustración 30 Efecto de la intensidad de fracturas en la fragmentación*

*Fuente 30 Elaboración propia*

A través de estos resultados de fragmentación se justifica el supuesto de que la intensidad de fracturas facilita considerablemente la formación de bloques, es decir, que a mayor número de fracturas o área de las mismas (intensidad o P32) el número de bloques y la fragmentación esperada será de menor tamaño y más uniforme, tal como se aprecia en las regiones a la derecha de la Ilustración en donde se tienen bloques y una fragmentación más pequeña que en los casos de la izquierda donde la medida de intensidad de fracturas (P32) es menor. En la sección, Anexo B se encuentran los resultados de todos los experimentos, para las 30 regiones, se presentan las respectivas curvas de fragmentación.

Por otra parte, se realizó el análisis de cuñas o “wedges” que se presenta en la siguiente ilustración. En color verde se muestran las cuñas formadas, alrededor de la excavación de color azul simulada para una región cuyo valor de P32 simulado es de 7, y que además cuenta con la presencia de 5 sets estructurales.

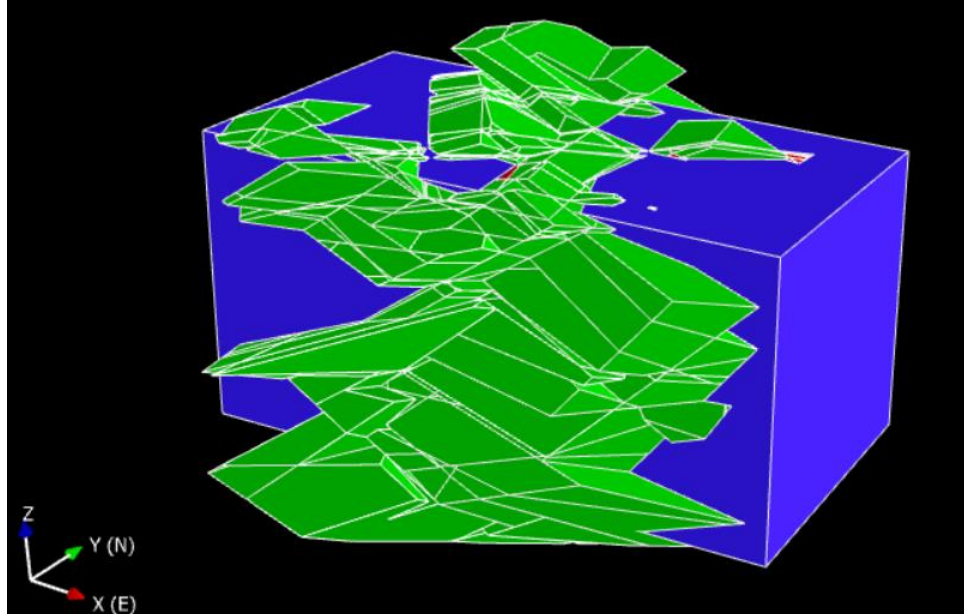


Ilustración 31 Análisis de Cuñas  
Fuente 31 Elaboración propia

Para mostrar el efecto de la orientación de los sets estructurales en la formación de cuñas, a continuación, se muestra lo anterior visto en 2D para 5 regiones manteniendo constante la intensidad de fracturas ( $P32 = 7$ ), pero cambiando el número de sets de fracturas en el modelo lo cual resulta en lo que se puede apreciar en la siguiente imagen,

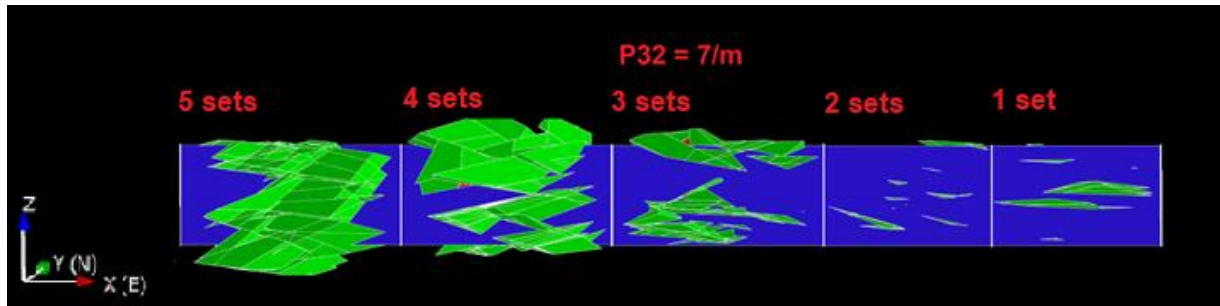


Ilustración 32 Efecto del número de sets en la formación de cuñas

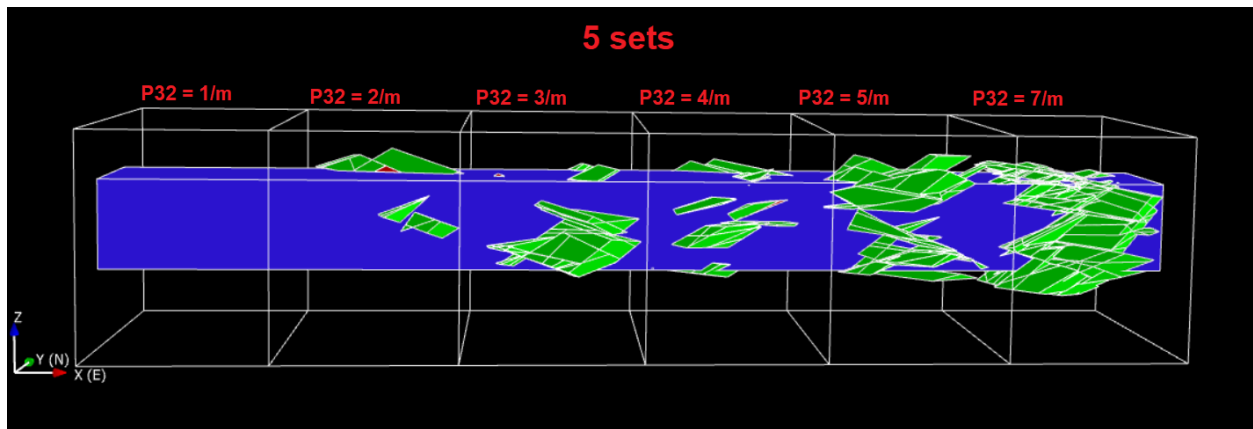
Fuente 32 Elaboración propia.

La imagen anterior respalda la hipótesis que se planteó respecto del efecto que tiene la orientación en la formación de cuñas similar a lo ocurrido en la fragmentación, esto pues se esperaba para aquellos lugares en donde las fracturas simuladas fuesen más paralelas (1 set estructural) entre sí la formación de cuñas fuese baja o inexistente, y que lo opuesto ocurriese para lugares donde las fracturas tuviesen orientaciones



variadas (5 sets estructurales) generándose gran número de cuñas y de tamaños mucho mayores.

Para mostrar el efecto de la intensidad de fracturas de los sets estructurales en la formación de cuñas, de manera análoga a continuación se muestran, resultados similares a la ilustración anterior, pero esta vez manteniendo constante el número de sets (número de sets = 5) involucrados, variando únicamente la intensidad de fracturas P32.



*Ilustración 33 Efecto de la intensidad de fracturas en la formación de cuñas*

*Fuente 33 Elaboración propia*

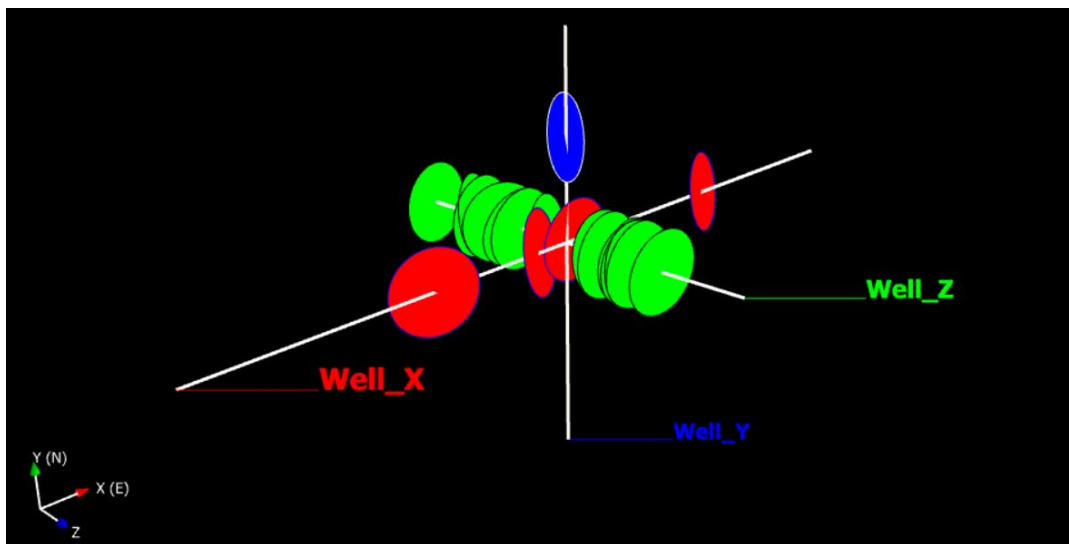
En base a estos resultados de estabilidad por formación de cuñas se justifica el supuesto de que la intensidad de fracturas facilita considerablemente la formación de cuñas, es decir, que a mayor número de fracturas o área de estas (intensidad o P32) el número de cuñas será mayor. En la sección, Anexo C se encuentran los resultados de todos los experimentos, para las 30 regiones, se presentan una tabla con los resultados de número de cuñas totales y su cálculo de estabilidad siguiendo el procedimiento que utiliza el software para el cálculo del factor de seguridad (Ver capítulo 2 sección 14).



## 4.2 Resultados de mapeo o Logging y su efecto en Circular Variance “C.V.”

Como se mencionó anteriormente en la sección “Logging simulado”, (capítulo 3 sección 4) la dirección de mapeo tiene incidencia en el número de fracturas registradas, esto pues dependiendo de la naturaleza (orientación) de las fracturas estas tenderán a ser más fáciles de registrar por líneas perpendiculares a su superficie.

La siguiente imagen retrata la problemática que conlleva la dirección de mapeo, para ello se muestran las fracturas mapeadas por las scanlines diseñadas siguiendo los ejes cartesianos, de color rojo, paralelo al eje “x” se tiene una scanline que detectó 4 discontinuidades simuladas, de color azul paralelo al eje “y” se tiene una scanline que detectó solo 1 de las discontinuidades simuladas, y de color verde, paralelo al eje Z se tiene una scanline que detectó 14 de las fracturas simuladas.



*Ilustración 34 Efectos de la dirección de mapeo en el número de fracturas.*

*Fuente 34 Elaboración propia.*

A continuación, y con motivos complementarios de lo anterior se muestra una tabla, en la cual se exponen algunos casos donde se aprecia el efecto que tiene la dirección de registro, así como también la influencia que tiene esta para el cálculo de la variable propuesta C.V. para ello se muestra en la primera columna el número total de fracturas simuladas y posterior a ello las registradas por cada scanline y el respectivo

valor de Circular Variance. Se presenta resaltada en gris una fila que corresponde al caso mostrado en la ilustración 34, y en azul un caso donde solo una fractura fue registrada y su efecto en C.V.

Tabla 10 Efecto de la dirección de mapeo, Fuente: Elaboración propia

Fracturas simuladas	Eje X		Eje Y		Eje Z	
	Numero de fracturas	C.V.	Numero de fracturas	C.V.	Numero de fracturas	C.V.
129	20	0.789	16	0.706	26	0.788
177	23	0.784	16	0.779	36	0.778
26					3	0.505
50	4	0.685	1	0.000	14	0.678
71	8	0.682	2	0.516	13	0.688
103	9	0.682	4	0.517	28	0.676
135	11	0.678	5	0.678	35	0.680
181	14	0.678	8	0.512	35	0.679
29	1	0.000	1	0.000	8	0.511

Por lo tanto y en vista de lo anterior se decidió utilizar el registro de fracturas obtenido de las scanlines orientadas en el eje Z para todos los razonamientos y cálculos, ya que esta scanline, es aquella que logra capturar el mayor número de fracturas, y carece de zonas sin detección de fracturas, a diferencia de las otras dos scanlines, logrando de esta manera que la estimación de la variable propuesta sea más robusta.

### 4.3 Resultados del método propuesto

En esta sección se muestran correlaciones entre el parámetro calculado de Circular Variance Calculado y su efecto en el número de cuñas y de fragmentos (bloques) así como también en el volumen de estos mismos.

Como ya fue demostrado anteriormente la formación de cuñas y bloques (fragmentación) no puede ser explicada en su totalidad por la orientación o por la intensidad de fracturas por sí solas, sino que ambas en su conjunto explican el fenómeno.

A continuación, se muestra el resultado de dos de los experimentos (los restantes pueden ser encontrados en el anexo D). ya mencionados, para los cuales se seleccionaron valores de P32 simulado respectivamente 3 y 5.

Tabla 11 Número de cuñas vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.

P32 Simulado = 3.0 / P32 estimado = 3.3				
N° sets	Circular Variance	N° Cuñas	N° de bloques	Vol. medio m <sup>3</sup>
5	0.8094	48	2199	0.364
4	0.9188	65	4489	0.178
3	0.6875	23	791	1.011
2	0.5113	17	471	1.699
1	0.0083	9	122	6.557

Las siguientes gráficas muestran la relación del parámetro calculado como Circular Variance con el número de bloques generados (fragmentación) y con el número de cuñas formadas manteniendo constante el valor de intensidad de fracturas (P32), este último además fue estimado por una metodología que permite su cálculo en sondajes (Hekmatnejad, 2018).

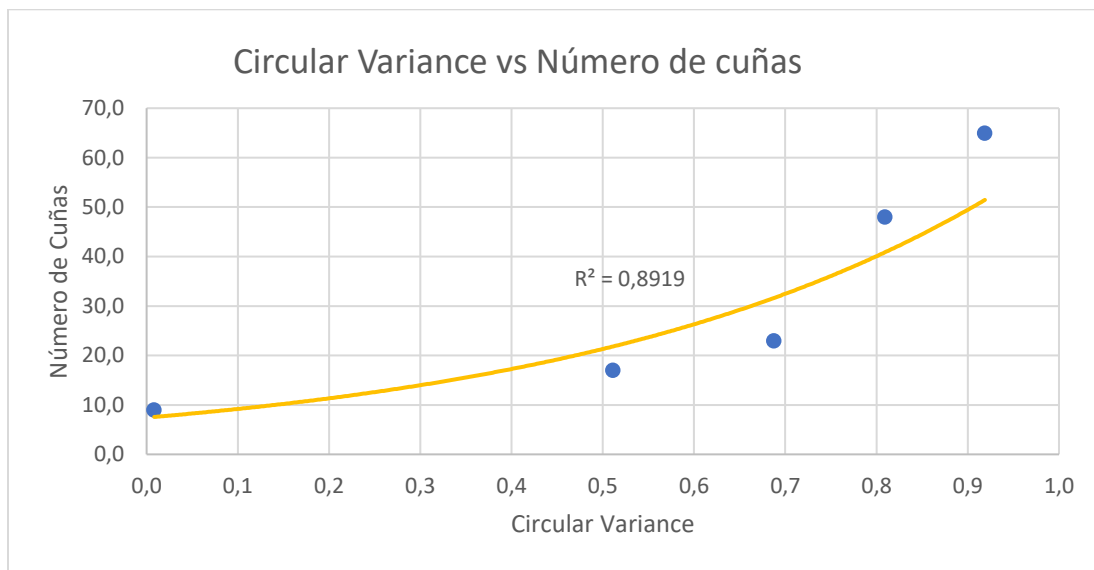


Ilustración 35 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas

Fuente 35 Elaboración propia

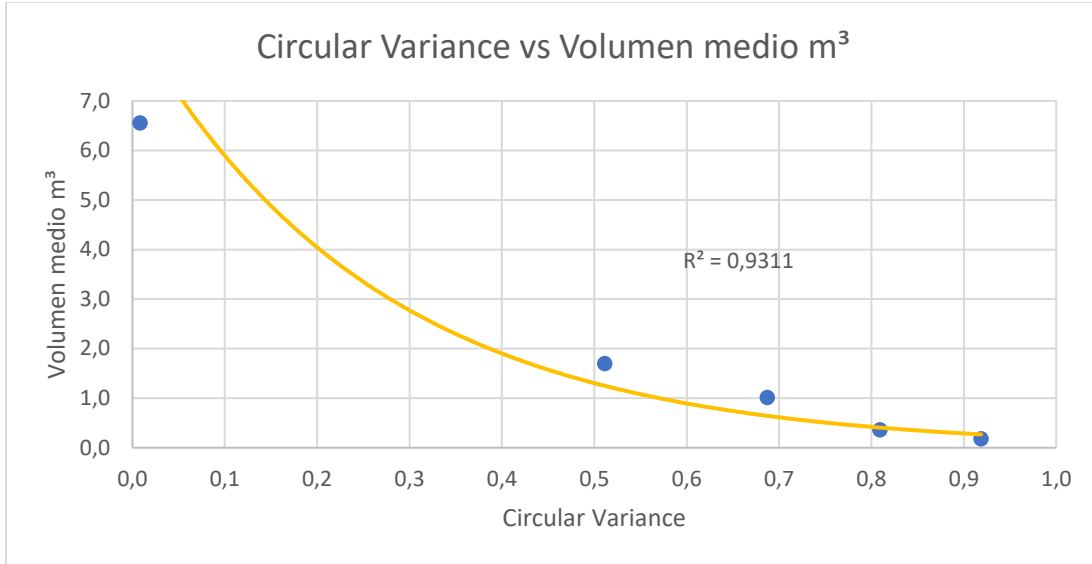


Ilustración 36 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio.

Fuente 36 Elaboración propia.

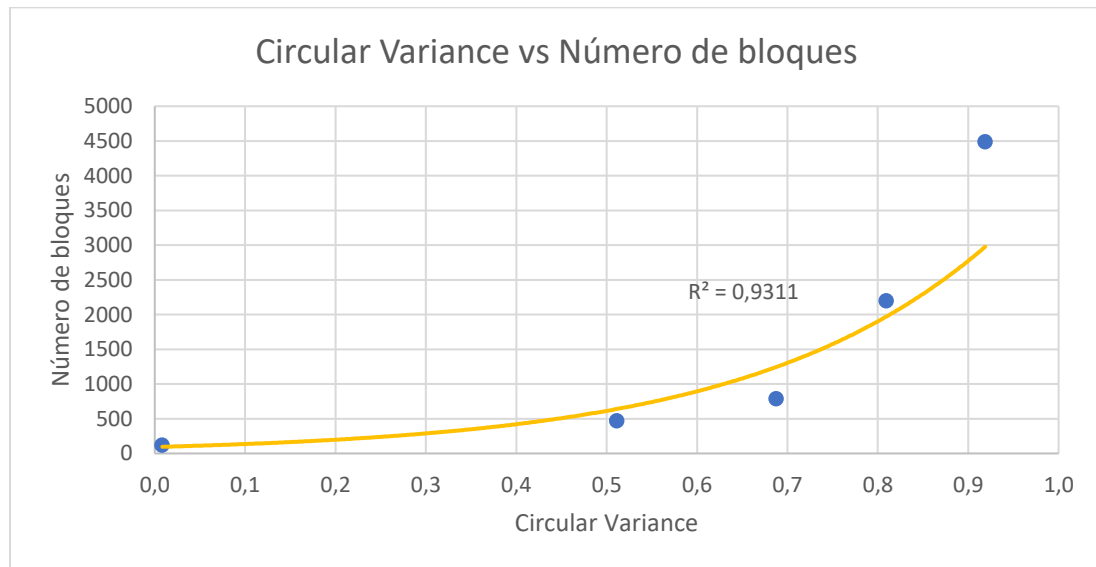


Ilustración 37 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.

Fuente 37 Elaboración propia

Con estos resultados se puede confirmar la correlación entre Circular Variance tanto para los 3 casos en estudio, en el primero y el tercer caso se observa una directa correlación del tipo exponencial positiva, y en el segundo una correlación del tipo exponencial negativa, esto para un DFN con un valor de P32 medio (P32 simulado 3).

Para evaluar el comportamiento y el ajuste de la variable propuesta en casos donde la intensidad de fracturas es mayor, se presentan a continuación los resultados para un caso cuyo P32 simulado fue 5.

Tabla 12 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.

P32 = 5 / P32 estimado = 5.5				
N° sets	N° cuñas	Volúmen medio m <sup>3</sup>	N° de bloques	C.v
5	270	0.120	6666	0.816
4	262	0.062	8503	0.848
3	117	0.318	2517	0.680
2	38	0.391	2047	0.507
1	30	1.860	430	0.007

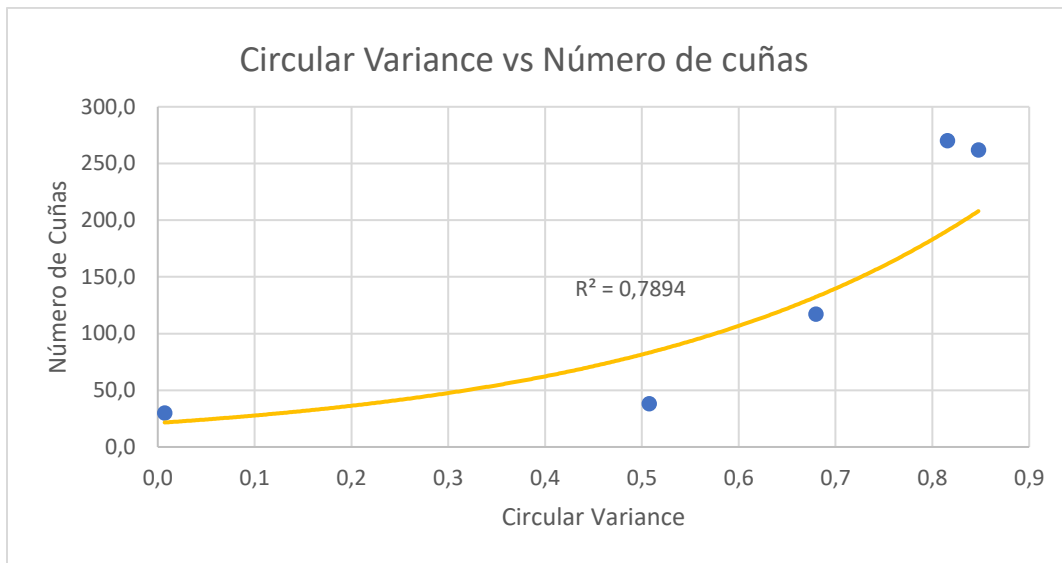


Ilustración 38 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.

Fuente 38 Elaboración propia.

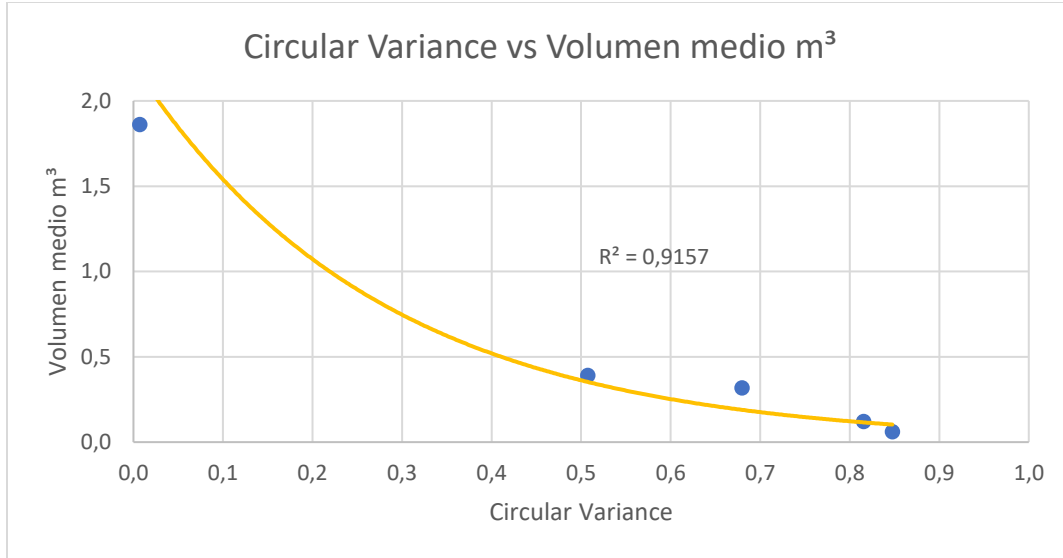


Ilustración 39 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio.

Fuente 39 Elaboración propia.

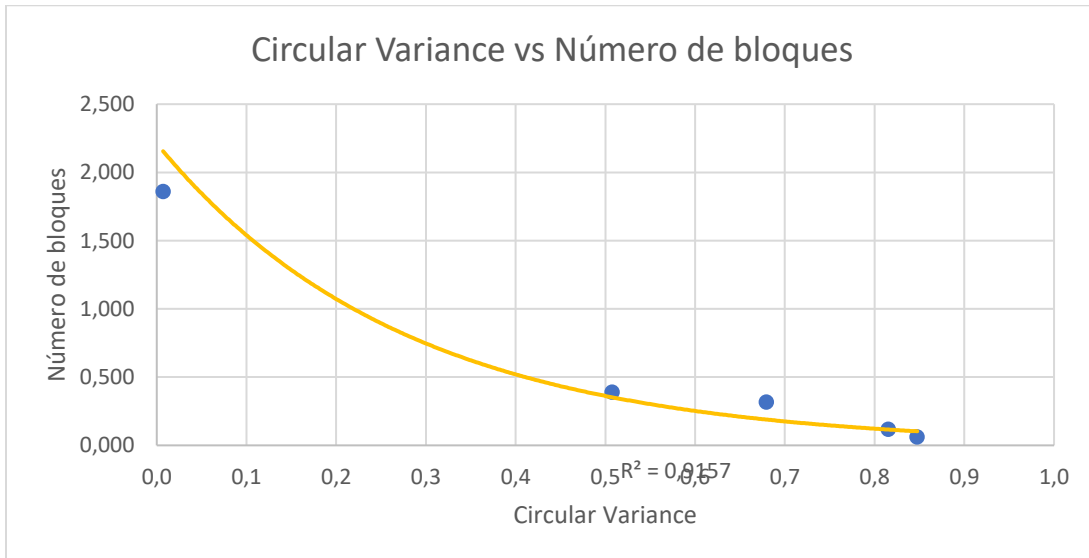


Ilustración 40 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.

Fuente 40 Elaboración propia.

De manera similar al caso anterior ( $P32 = 3$ ) se puede confirmar la correlación entre Circular Variance para los 3 casos en estudio, pero esta vez para regiones donde la intensidad de fracturas es mucho mayor ( $P32$  simulado = 5).

Finalmente se elaboró un gráfico general manteniendo constante el valor de  $P32$ , lo cual permite exponer la influencia de la variable C.V. para el número de cuñas

generados, y número de bloques. Los valores de P32 fueron estimados en base a (Hekmatnejad, 2018).

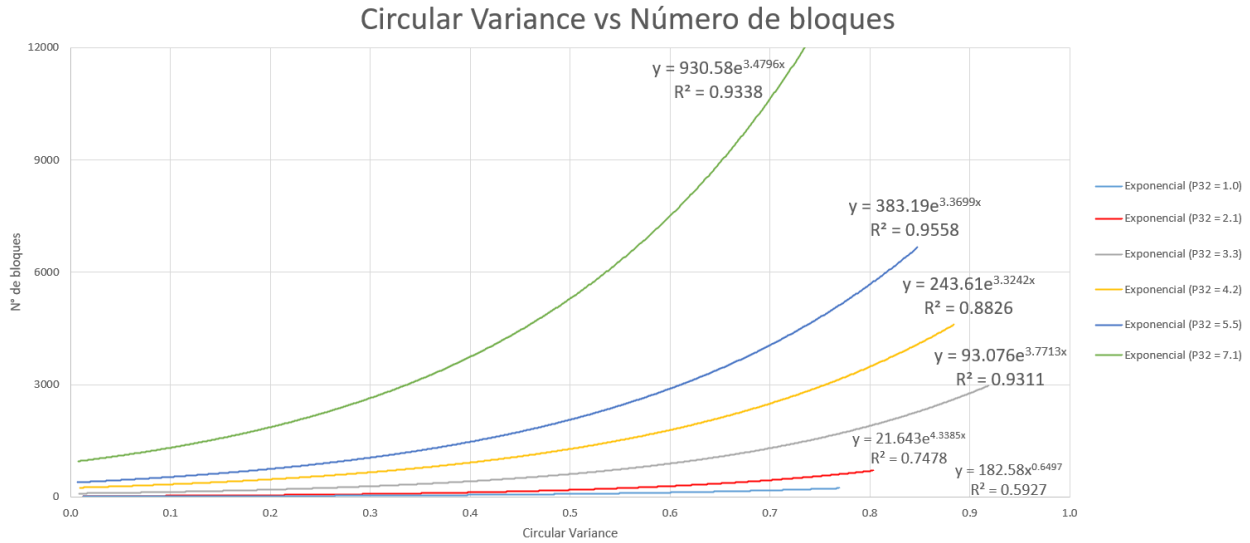


Ilustración 41 Gráfico general para Circular Variance vs Número de bloques.

Fuente 41 Elaboración propia.

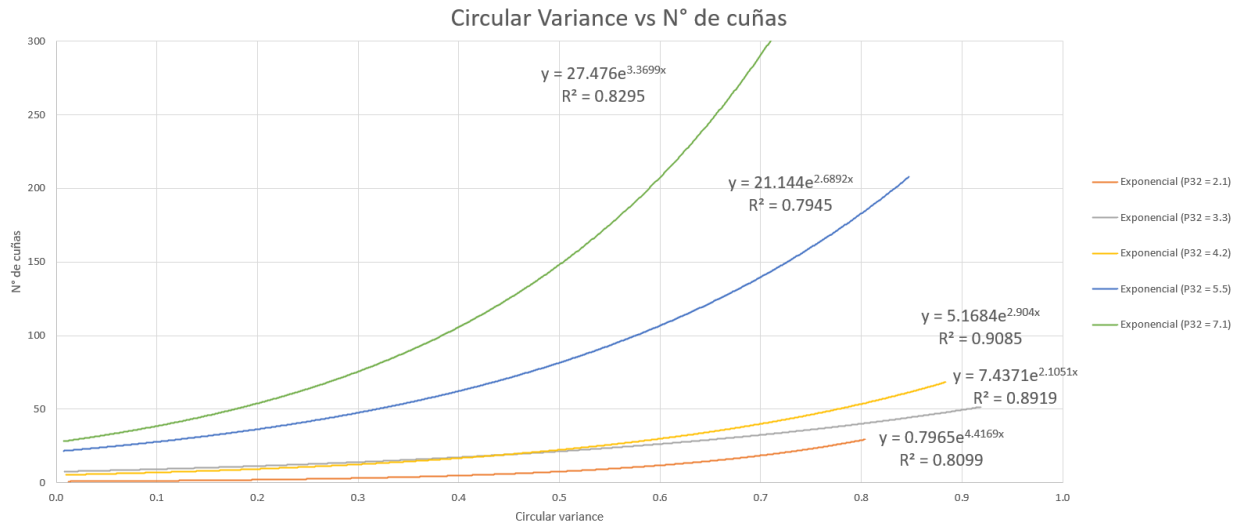


Ilustración 42 Gráfico general para Circular Variance vs Número de Cuñas.

Fuente 42 Elaboración propia.

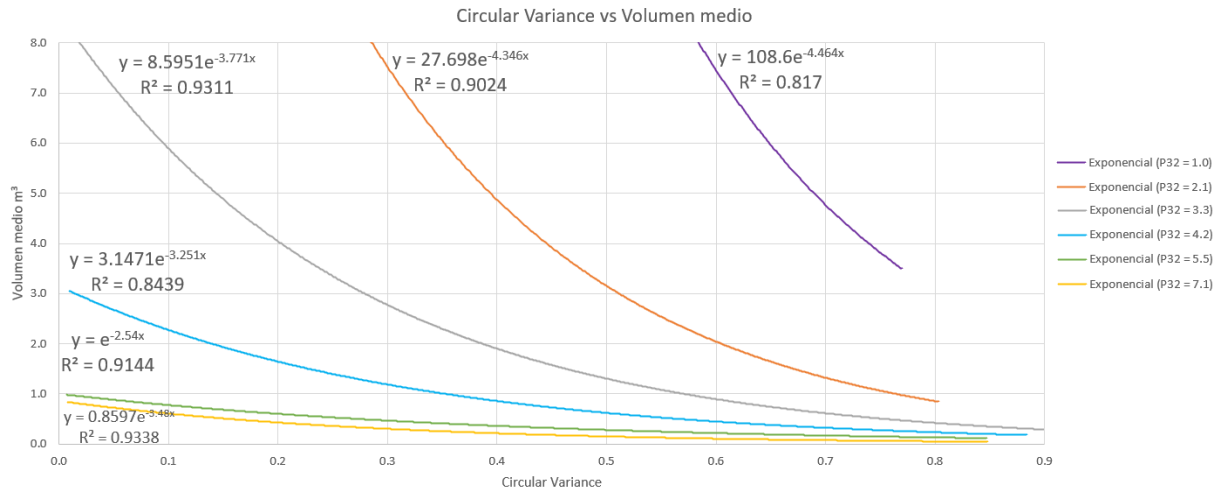


Ilustración 43 Gráfico general para Circular Variance vs Volumen medio de bloques.

Fuente 43 Elaboración propia.

La construcción de estas gráficas permite un completo asesoramiento, o predicción de tanto la estabilidad como fragmentación, utilizando información proveniente de data en 1D para ello se deben seguir los siguientes pasos:

- Utilizar metodología (Hekmatnejad, 2018) para el cálculo del valor de P32 en dicho sondaje o línea de mapeo, con este valor seleccionar una curva.
- Luego calcular el valor de C.V. de dicha zona utilizando las orientaciones de las fracturas mapeadas.
- Analizar la proyección de dicha curva en el eje Y.

Es posible de esta manera tener un aproximado de la fragmentación y la estabilidad en una cierta zona del macizo rocoso, sin la necesidad de una inversión adicional de manera rápida y simple.

Se observa un mejor ajuste de la curva “Circular Variance vs número de cuñas” y “Circular Variance vs Número de bloques” con valores de P32 mayores a 2, lo cual puede deberse a dos grandes factores.

- 1) El aumento de la intensidad de fracturas favorece la formación de bloques y con ello la predicción de la formación de bloques es más factible, a diferencia de cuando la intensidad es baja el número de bloques es menor por lo tanto



ser más exacto se vuelve más complejo u otras variables se vuelven más relevantes.

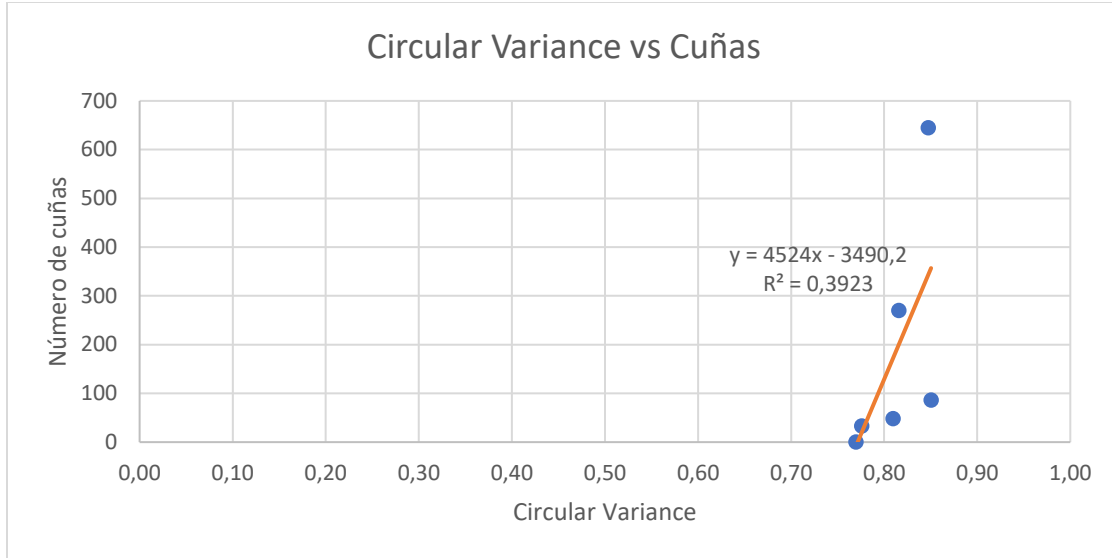
- 2) Con el aumento de la intensidad de fracturas también aumenta el número de fracturas mapeadas, por ende, la variable Circular Variance posee más información del macizo rocoso (es más robusta) pudiendo explicar mejor su comportamiento.

#### 4.4 Precauciones en el cálculo de “C.V.”

Adicionalmente se realizaron estudios de la variable Circular Variance para casos donde el valor de la intensidad de fracturas P32 no permanece constante, con la finalidad de explicar las consecuencias que podría tener el uso de C.V. sin tener en consideración la variable intensidad, para ello a continuación se presenta un estudio de 7 casos donde se tienen 5 sets de discontinuidades y la intensidad de fracturas varía tal como se aprecia en la siguiente tabla.

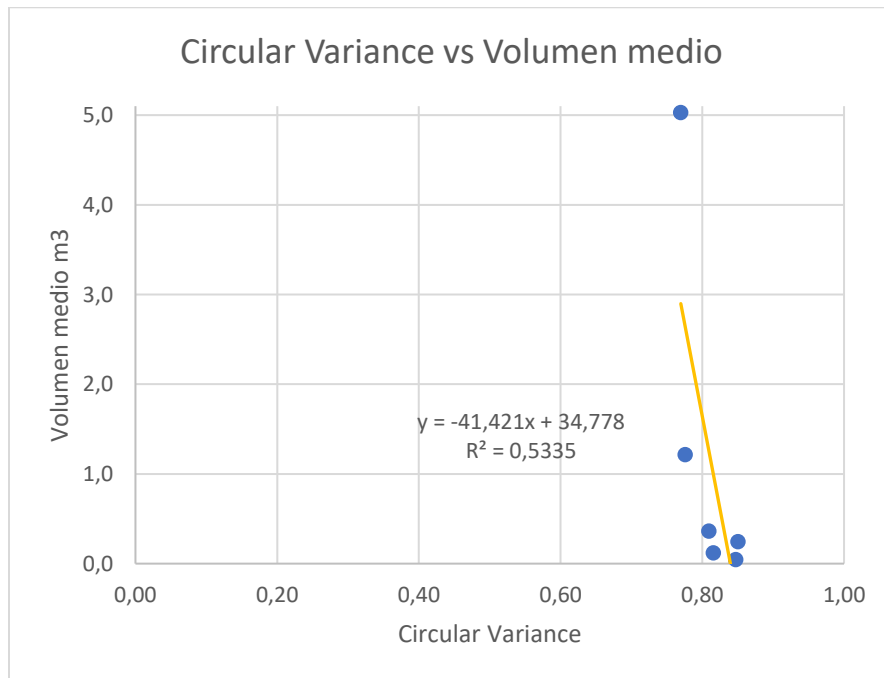
*Tabla 13 P32 simulado, Número de cuñas, Volumen medio, Número de bloques y Circular variance para 5 sets simulados, Fuente: Elaboración propia.*

5 Sets estructurales simulados				
P32 simulado	N° cuñas	Volumen medio m <sup>3</sup>	N° de bloques	Circular Variance
1	0	5.031	159	0.770
2	33	1.216	658	0.776
3	48	0.364	2199	0.809
4	86	0.247	3240	0.850
5	270	0.120	6666	0.816
7	645	0.048	16584	0.847



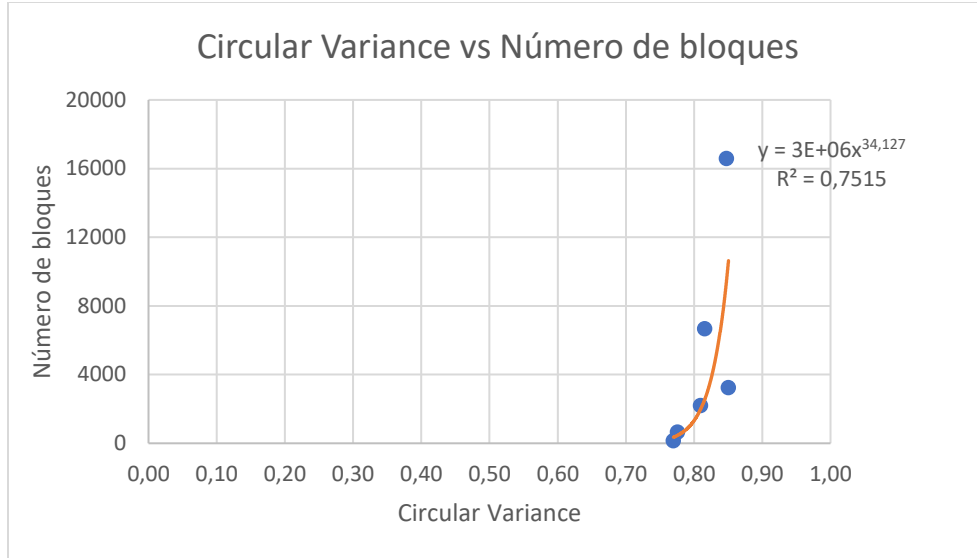
*Ilustración 41 Circular Variance vs Cuñas, variando P32.*

*Fuente 41 Elaboración propia.*



*Ilustración 42 Circular Variance vs Volumen medio, variando P32*

*Fuente 42 Elaboración propia.*



*Ilustración 43 Circular Variance vs Número de bloques, variando P32.*

*Fuente 43 Elaboración propia.*

Con estos resultados se logra apreciar claramente que no hay una correlación entre la variable propuesta C.V. respecto de las otras 3 variables en estudio, esto debido a que el valor de P32 no permanece constante, incluso para el último caso donde se aprecia un valor de  $R^2$  de 0.7515 lo cual sugiere un relativo ajuste, sin embargo, esto no es del todo representativo pues la variable propuesta varía en el intervalo  $]0,1]$  y no entre  $[0.1,0.3]$  como señala dicho caso. Con estos 3 casos se demuestra la absoluta dependencia que tiene C.V. con intensidad de fracturas.

## Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.

### 5.1 Conclusiones

En esta investigación se desarrolló una metodología/variable que permite encontrar las zonas del macizo rocoso que presentan gran facilidad para formar bloques, con ello se pueden inferir a su vez informaciones respecto de la fragmentación local y la estabilidad basada en la formación de cuñas.

El parámetro denominado como Circular Variance representa de buena manera el apartado anterior, esto sí y solo si se conoce información respecto de la intensidad de fracturas en la zona que está siendo analizada, como se logró demostrar en la última parte de resultados no es posible establecer una relación entre “C.V” y fragmentación si la intensidad no es constante.

El comportamiento de la Circular Variance tiende a seguir una tendencia del tipo exponencial, la cual puede ser utilizada tanto para determinar el número bloques esperado, su volumen o el número de cuñas de una zona, para ello el valor de intensidad de fracturas debe ser conocido.

Lo anterior también es posible de apreciar al hacer una comparativa entre la variable Circular Variance con el tamaño medio del bloque generado, se aprecia claramente que cuando el valor de este parámetro es cercano a 0, el tamaño de los bloques es máxima y lo contrario ocurre cuando la variable es cercana a 1.

Un análisis similar a lo anterior fue realizado pero esta vez para el número de Número de cuñas o “wedges”, se logró demostrar que el valor de C.V. cercano a 1 aumenta el número de cuñas, sin embargo está sumamente relacionado con el valor de P32 ya que para valores muy bajos de P32 el número cuñas puede ser 0 sin importar el valor de C.V., así como para valores muy altos de P32 el número de Free fall wedges será alto para todos los valores de C.V.

Una de las ventajas de la variable C.V. es que no requiere de una inversión mayor para su estimación, debido a que este puede ser obtenido mediante Scanlines en frentes

de galerías o a lo largo de las mismas, también de manera homóloga este puede ser calculado utilizando información de sondajes, lo cual resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos y permite un ahorro económico en otras áreas, ya que se están utilizando los recursos que ya se tienen sin tener que realizar algún estudio aparte, que requiera de una inversión.

La simulación de DFN utilizando ajustando de parámetros del tipo estocástico permite realizar pruebas o testear metodologías que sin ella serían muy difíciles de realizar y cuantificar su eficacia, todo esto gracias a la posibilidad que entregan estos DFN de diseñar o simular macizos rocosos y conocer toda la información de este.

Dentro de las muchas medidas de intensidad de fracturas, en esta memoria se trabajó con P32. La relación que tiene esta medida con la variable calculada resulta ser excepcional, esto se aprecia considerablemente al variar el valor de P32 o al mantener el mismo constante.

El estudio fue realizado simulando fracturas como discos planares, simulados aleatoriamente en una región determinada (modelo Enhanced Beacher) , asignando la misma probabilidad a cada disco de estar en un lugar, eliminando de esta manera el sesgo de localidad que pudiese existir al concentrar las fracturas en una zona específica, por otra parte en la realidad la forma de las fracturas resulta ser más compleja que la descrita resultando en algunos casos como discos alargados con o sin ondulación, sin embargo, la aproximación realizada en esta experimentación no debiese afectar significativamente el o los valores de C.V. pues este valor depende únicamente de las orientaciones de los planos de discontinuidad, no obstante, lo anterior pudiese afectar el número de fracturas mapeadas dependiendo de la técnica que se utilice.

## 5.2 Recomendaciones

Relacionar las variables realizadas en este estudio con otros parámetros de fragmentación como factor de forma, volumen máximo de bloque, largo de bloque u otros.

Los cálculos en el software utilizados, requieren de una larga espera debido al uso exclusivo de CPU por parte del software, por ello se sugiere probar otros softwares que integren la capacidad gráfica del computador GPU.

Para los cálculos de tamaño de bloque se trabajó con un bloque mínimo de 10 cm<sup>3</sup> el cual requiere un largo tiempo de cálculo, para resultados más certeros se sugiere utilizar un tamaño aún menor de ser posible con el uso de procesadores más rápidos.

Para estabilidad, realizar estudios para túneles de distintas formas y tamaños.

La variable propuesta depende en gran medida de la dirección de como esta sea medida. Mejores estimaciones son obtenidas en las zonas cuando es posible atravesar un mayor número de fracturas con la línea de muestreo, para el caso de estudio la orientación de las fracturas, su naturaleza tiende a ser más fácil de registrar con scanlines en la dirección del eje z, en Anexo E se muestra un pequeño esquema que puede ayudar a la determinación de la dirección de una línea de mapeo en el terreno.

En zonas donde el Número de fracturas es 0 o 1 el valor de C.V. toma valores nulos o 0, y esto puede sesgar notoriamente la estimación por ello se sugiere que para el cálculo de Circular Variance el número de fracturas mapeadas sea 2 o superior.

Una de las recomendaciones más importantes que se sugiere al momento de utilizar la variable en estudio, sin duda es conocer el valor de intensidad de fracturas P32, variable para la cual existen diversas maneras de calcular en terreno (Chilès, Wackernagel, Beucher, Lantuéjoul, & Élion, 2008), si se cuenta información de sondajes el método (Hekmatnejad, 2018), presenta resultados favorables, una relación entre ambos valores simulados y estimados a través de este método se encuentra en el Anexo F.

La dirección de mapeo también tiene una relativa significancia en el cálculo de la variable propuesta, esto debido a la orientación de las discontinuidades, ya que resulta más probable mapear aquellos planos de discontinuidades cuya orientación sea perpendicular a la línea de mapeo, en caso contrario, fracturas paralelas a la línea de mapeo en estricto rigor no son mapeadas. Lo anterior puede ser deducido fácilmente

observando la red estereográfica de las discontinuidades mapeadas y de igual manera la de líneas de mapeo. En Anexo E se presenta La red estereográfica una región cuyo número de sets es 5 y P32 7, además se le añadió como puntos las direcciones de las líneas de mapeo en las direcciones cartesianas.

El efecto escala tampoco fue estudiado en esta oportunidad, lo cual podría sugerir la necesidad de realizar más muestreos dependiendo de la región que se quiera estudiar, en esta oportunidad se trabajó con una Scanline de 4 metros explicando bien el comportamiento en términos de fragmentación y estabilidad para una región de 8x10x10m, no obstante el resultado puede cambiar rotundamente si se intenta explicar lo mismo en una región de mayor tamaño por ejemplo, una scanline de 4m en una región de 100x100x100m este último efecto de escala también sería un interesante tema para futuras investigaciones.

También para fines investigativos se sugiere realizar relaciones entre el valor de C.V. con medidas de intensidad como P21, P10, Fracture count u otros.

En esta oportunidad no se consideraron variables del tipo geológicas, pero resultaría interesante realizar una comparativa entre por ejemplo el tipo de yacimiento y la Circular Variance que pueden tener las fracturas en cada uno de los tipos de yacimientos.

Diferentes gráficos se realizaron con el objetivo de estimar Fragmentación en término de número de bloques y tamaño, y para estabilidad número de cuñas, utilizando como base de la estimación la variable C.V. y complemento intensidad de fracturas o P32, dichos gráficos pueden ser encontradas en anexo G.

## Capítulo 6 Bibliografía

- Baecher, & B, G. (1983). Statistical Analysis of Rock Mass Fracturing. *Mathematical Geology* 15, 329 - 348.
- Baecher, G. B., Lanney, N. A., & Einstein, H. H. (1977). Statistical Description of Rock Properties and Sampling. *Proceedings of the 18th U. S. Symposium on Rock Mechanics*, 5C1-8.
- Barton, N., & Grimstad, E. (1993). Updating the Q-System for NMT. *Proc. int. symp. on sprayed concrete - modern use of wet mix sprayed concrete for underground support*, 46-66.
- Barton, N., Loset, F., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech* 6 (4), 189-239.
- Beacher, G. (1980). Progressively censored of rock joint traces. *Journal of the International Association for Mathematical geology*, 12, 33-40.
- Beacher, G. B. (1983). Statistical analysis of rock mass fracturing. *Mathematical geology*.
- Bieniawski, Z. (1976). Rock mass classification in rock engineering. *In exploration for rock engineering proc. of the symp.*, 97-106.
- Bieniawski, Z. (1978). Determining Rock Mass Deformability Experience from Case Histories. 237-247.
- Bieniawski, Z. (1989). Engineering rock mass classifications.
- Chan, L., & Goodman, R. (1983). Prediction of support requirements for hard rock excavations using key-block theory and joint statistics. *24th Symposium on Rock Mechanics*.
- Chilès, J.-P., Wackernagel, H., Beucher, H., Lantuéjoul, C., & Élion, P. (2008). ESTIMATING FRACTURE DENSITY FROM A LINEAR. *GEOSTATS*, 1-10.



- Cundall, P. (1971). A computer model for large scale movements of blocky rock systems. *In: Proc. symp. ISPM. Nancy, France.*
- Deere. (1969). Design of tunnel liners and support system. *Office of high speed ground transportation, U.S. Department of transportation.*
- Deere, D. (1989). *Rock quality designation (RQD) after 20 years.* Vicksburg: US Army Corps Engrs Contract Report.
- Deere, D., & Deere, D. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In *Rock classification systems for engineering purposes. ASTM Special Publication,* 91-101.
- Deere, D., Hendron, A., P. F., & Cording, E. (1967). Design of surface and near surface construction in rock. *New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.,* 237-302.
- Dershowitz, & Einstein, H. (1988). Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering,* 21-51.
- Dershowitz, W. S., & Herda, H. H. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. *Rock Mechanics,* 1-10.
- Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P., & Thomas, A. (2004). FracMan, interactive discrete feature data analysis, geometric modelling, and exploration simulation. *Golder Associates Inc, Seattle, Washington.*
- Diederichs, M., & Kaiser, P. (1999). Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the voussoir analogue revisited. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. ,* 97-117.
- Elmo, D., Rogers, S., Stead, D., & Eberhardt, E. (2014). Discrete Fracture Network approach to characterise rock mass fragmentation and implications for geomechanical upscaling. *Institute of Materials, Minerals and Mining and The AusIMM.*
- Elmo, D., Stead, D., & Rogers, S. (2015). Guidelines for the quantitative description of discontinuities for use in discrete fracture network engineering. *In: Proceedings*

of the 13th ISRM international congress of rock mechanics. *International society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM)*, 587.

Elmouctie, M., Krähenbühl, G., & A., s. (2016). A new excavation analysis method for slope design using discrete fracture network based polyhedral modelling. *Computers & Geotechnics.*, 93-104.

Gabrielsen. (1990). Characteristics of joints and faults. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen Norway.*, 11-17.

Gen Hua Shi, & Richard E. Goodman. (1981). A New Concept For Support Of Underground And Surface Excavations In Discontinuous Rocks Based On A Keystone Principle. *American Rock Mechanics Association*.

Golder, a. (2017). *Fracman 7.7 Workbook*.

Goodman, R. E., & Shi, G.-h. (1985). *Block Theory and its application to Rock Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall.

Grenon, M., Landry, A. H., & Lajoie, P. (2017). Discrete fracture network-based drift stability at the Eléonore mine. *Mining Technology*, 22-33.

Hadjigeorgiou, J. (2012). Where do the data come from? *In: Proceedings of the 6th international seminar on deep and high stress mining. Perth, Australian Centre for Geomechanics*, 77-259.

Hekmatnejad, A. (2018). Geostatistical Modeling of Discrete Fracture Networks for Geomechanical applications in heterogeneous fractured media based on the cox-boolean model. 38-42.

Hoek-Brown. (1980). Underground excavation in rock. *Institution of mining and metallurgy*, 527.

Hudson, J. A., & Priest, S. D. (1979). Discontinuities and Rock Mass. *Int. d. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 16*, 340-343.

- International society for Rock mechanics. (1978). SUGGESTED METHODS FOR THE QUANTITATIVE DESCRIPTION OF DISCONTINUITIES IN ROCK MASSES. Great Britain: Pergamon Press Ltd.
- International Society for Rock Mechanics Commission on standardization of laboratory field tests. (1978). *International Journal of Rock Society Mining Science*, 319-368.
- Kenneth, K. L. (1958). Simplified Strike and Dip recording. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists.*, 191.
- La pointe, P. W. (1993). Stochastic estimation of fracture size Through simulated sampling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*, 1600-1607.
- Lanru Jing. (2000). Block system construction for three-dimensional discrete element models of fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 645-659.
- Laslett, G. (1982). Censoring and edge effect in areal and line transect sampling of rock joint traces. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 125-140.
- Lee, C.-C., Lee, C.-H., Yeh, H.-F., & Lin, H.-I. (2010). Modeling spatial fracture intensity as a control on flow in fractured rock. *Department of Resources Engineering, National Cheng Kung University*.
- Lin, D., Fairhurst, C., & Starfield, A. (1987). Geometrical Identification of Three-dimensional Rock Block Systems Using Topological Techniques. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 331-338.
- Mardia, K. V. (1972). *Statistics of Directional Data*. Londres: ACADEMIC PRESS INC (LONDON) LTD.
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek., E. (2004). The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 55-65.

- Merritt, A. (1972). Geologic prediction for underground excavations. *New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.*, 115-132.
- Palmström, A. (1982). The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock jointing. *Proc. 4th Congr. Int. Assn Engng Geol, Delhi 5*, 221-228.
- Palmström, A. (1995). Characterizing the strength of rock masses for use in design of underground structures. *Design and Conshuction of Underground Structures*, 23-25.
- Palmström, A. (1995). RMI – a rock mass characterization system for rock engineering purposes. *Ph.D. thesis, Oslo University, Norway.*, 400.
- Palmström, A. (1996). The Rock Mass index (RMI) applied in rock mechanics and engineering. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, Vol. 11*, 1-40.
- Palmström, A. (2000). Block size & Block size distribution. *Reliability of clasifications systems*.
- Palmström, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD).
- Park, B., Kim, K., Kwon, S., Kim, C., Bae, D., Hartley, L., & Lee, H. (2002). Determination of the hydraulic conductivity components using a three-dimensional fracture network model in volcanic rock. 121-174.
- Priest, S. D. (1993). Discontinuity Analysis for Rock Engineering. 5-10.
- Priest, S., & Hudson, J. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 135-148.
- Qinghua, L., John-Paul, L., & Chin-Fu, T. (2016). The use of discrete fracture networks for modelling coupled. *Computers and geotechnics*, 3-5.
- R.S. Fisher. (1952). Dispersion on a sphere. *Proceeding of the royal society*, 295-305.
- Ritter, W. (1879). Die Statik der Tunnelgewölbe.

- Salvini, R., Mastrorocco, G., Seddaiu, M., Rossi, D., & Vanneschi, C. (2017). The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modeling. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 34-52.
- Shi, G. (1988). Discontinuous Deformation Analysis - a new numerical model for the statics and dynamics of block systems. *Ph.D. Thesis University of California, Berkeley, USA*.
- Sturzenegger, M., Stead, D., & Elmo, D. (2011). Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Engineering Geology*, 96-111.
- Terzaghi. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports. In *Rock tunneling with steel support*. 17-99.
- Tollenaar, R. (2008). Characterisation of discrete fracture networks and their influence on caveability and fragmentation,. *MASc Thesis, The University of British Columbia, Vancouver*.
- Wickham, G.E., Tiedermann, H.R., & Skinner, E. (1972). Support determination based on geologic predictions. *North American rapid excav. tunneling conf, Chicago*, 43-64.
- Zhang, L., & Einstein, H. (2000). Estimating the intensity of rock discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2-5.

## Anexos

### Anexo A.

#### Redes estereográficas de las regiones simuladas

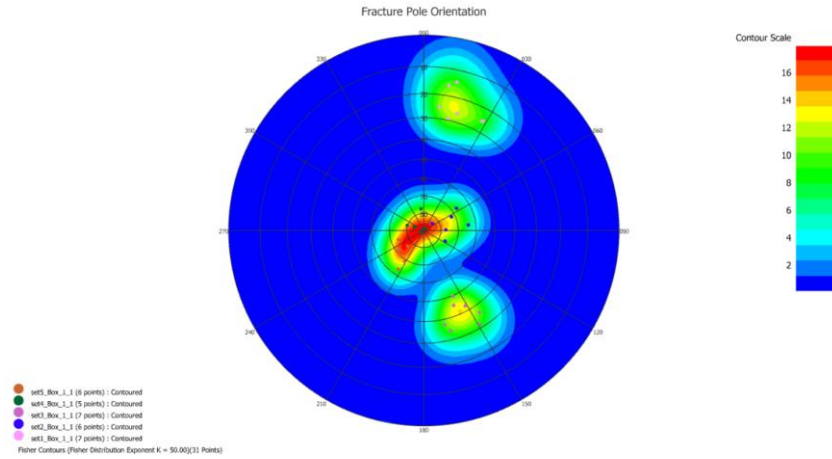


Ilustración 44 Red estereográfica región 1.

Fuente 44 Elaboración propia

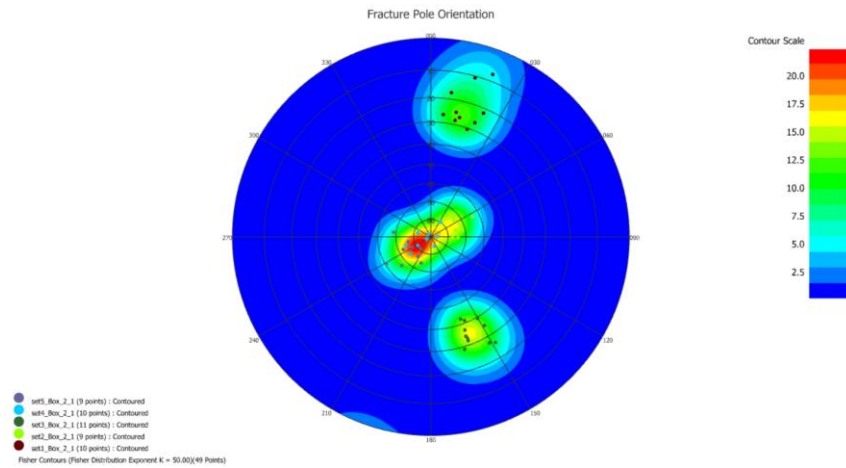


Ilustración 45 Red estereográfica región 2.

Fuente 45 Elaboración propia.

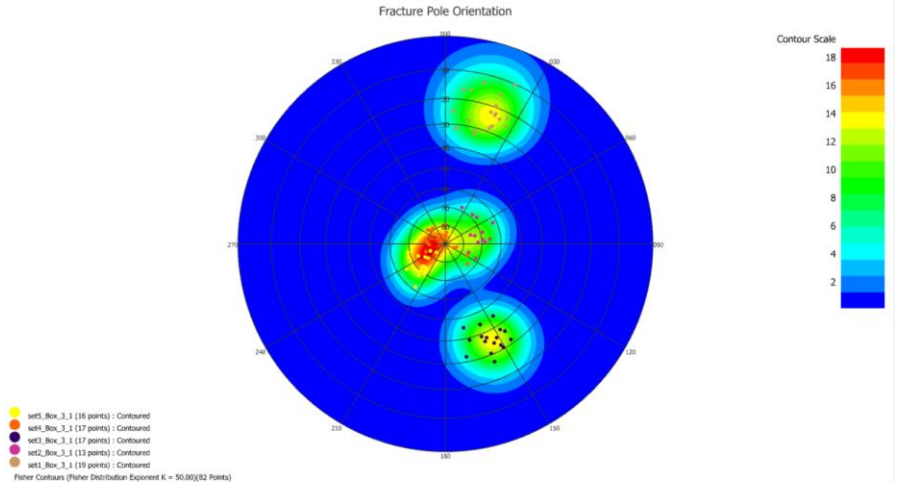


Ilustración 46 Red estereográfica región 3.

Fuente 46 Elaboración propia.

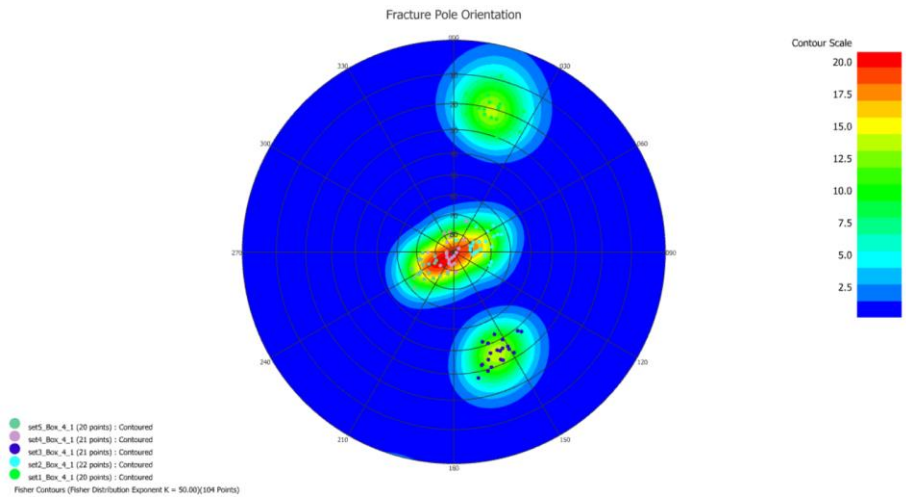


Ilustración 47 Red estereográfica región 4.

Fuente 47 Elaboración propia.



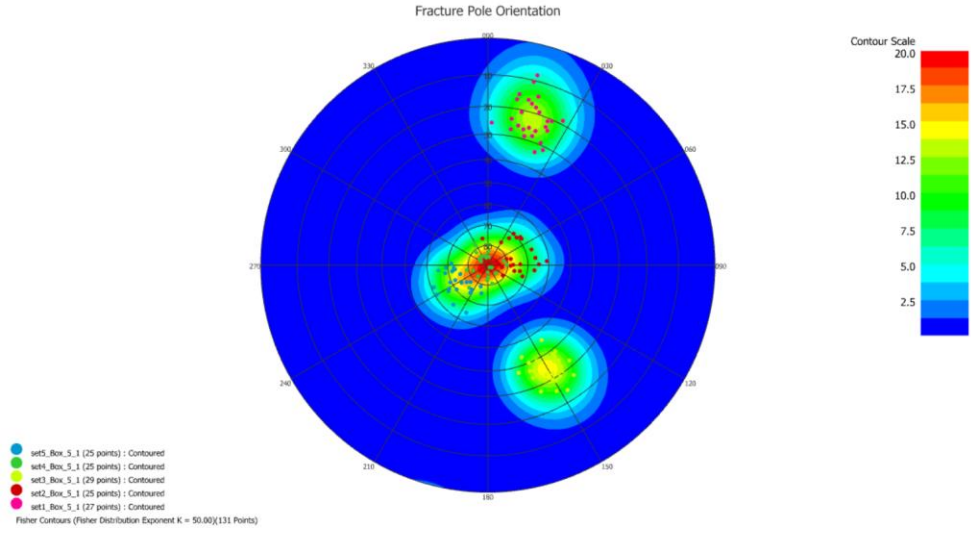


Ilustración 48 Red estereográfica región 5.

Fuente 48 Elaboración propia.

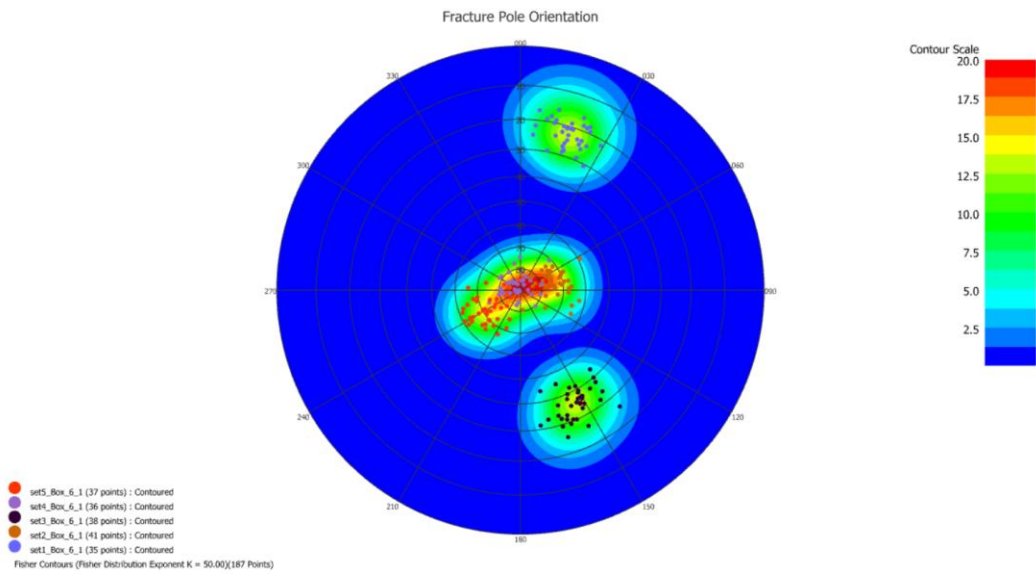


Ilustración 49 Red estereográfica región 6

Fuente 49 Elaboración propia.



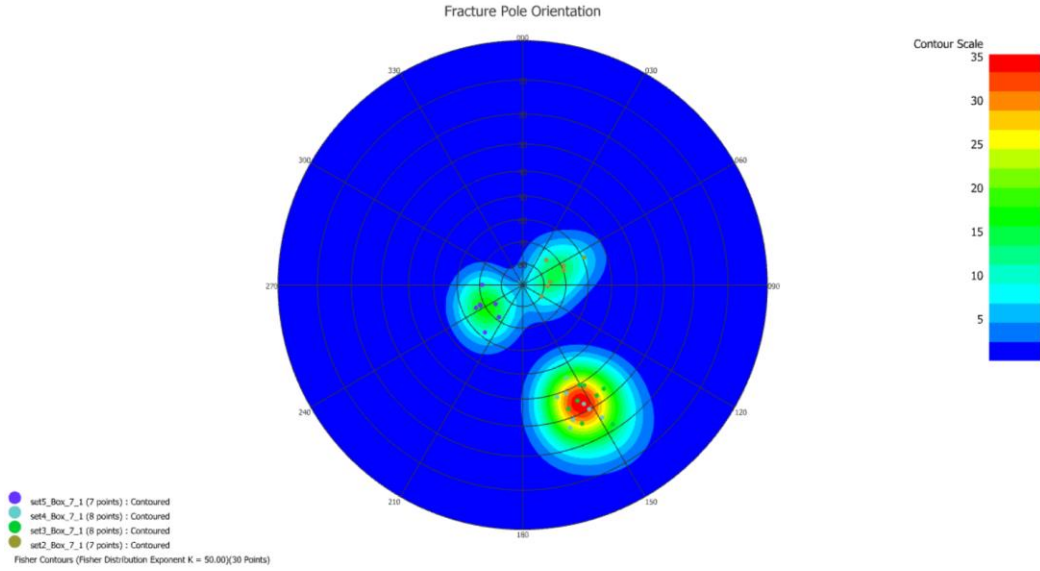


Ilustración 50 Red estereográfica región 7.

Fuente 50 Elaboración propia.

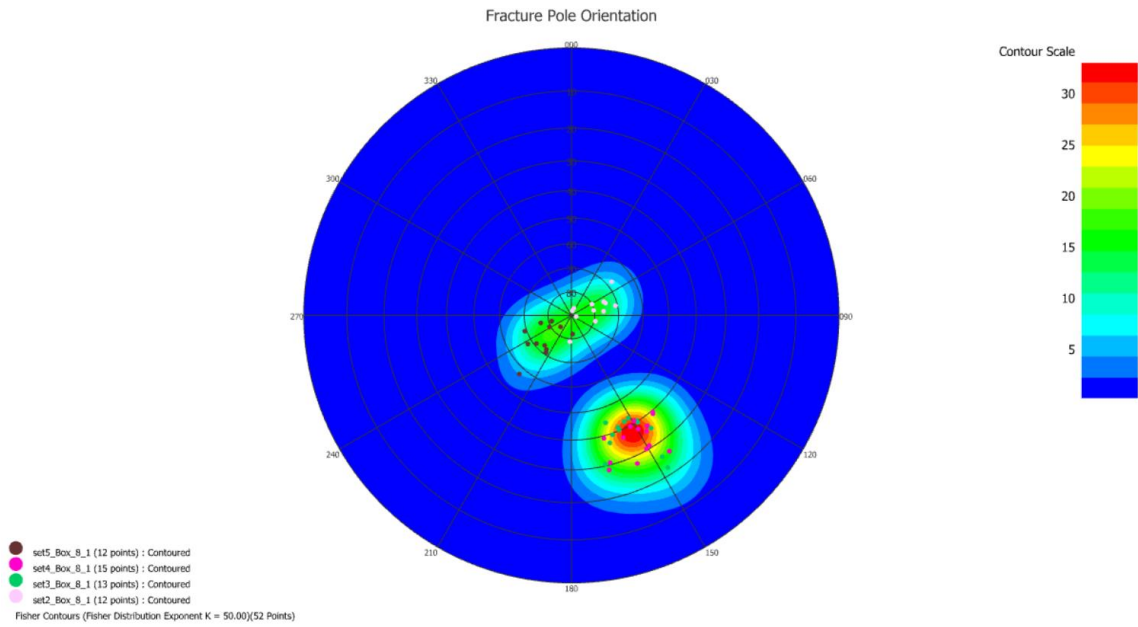
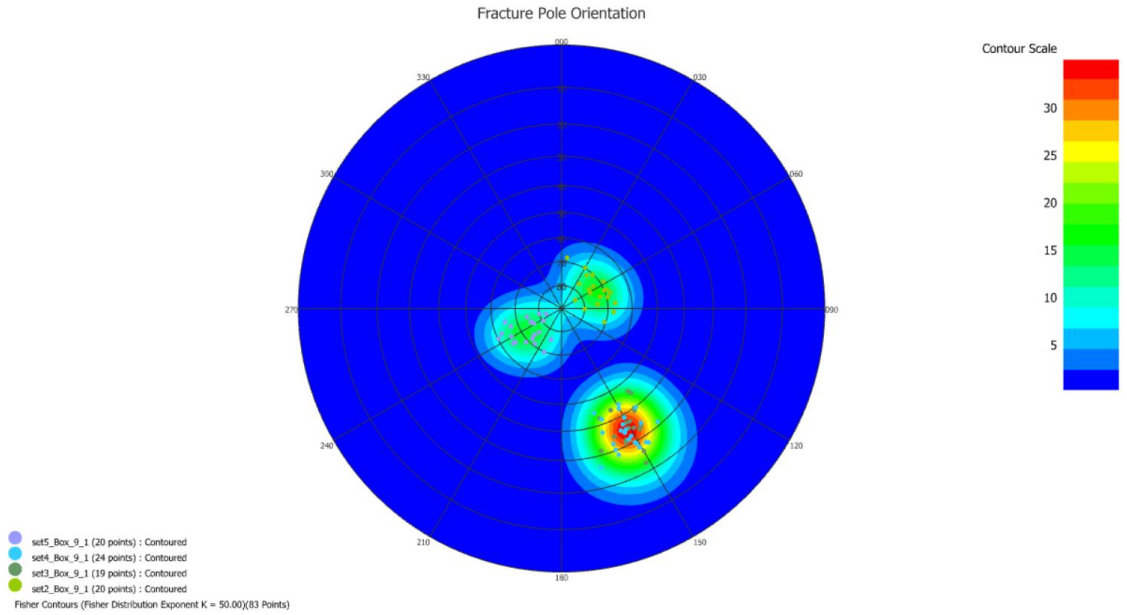


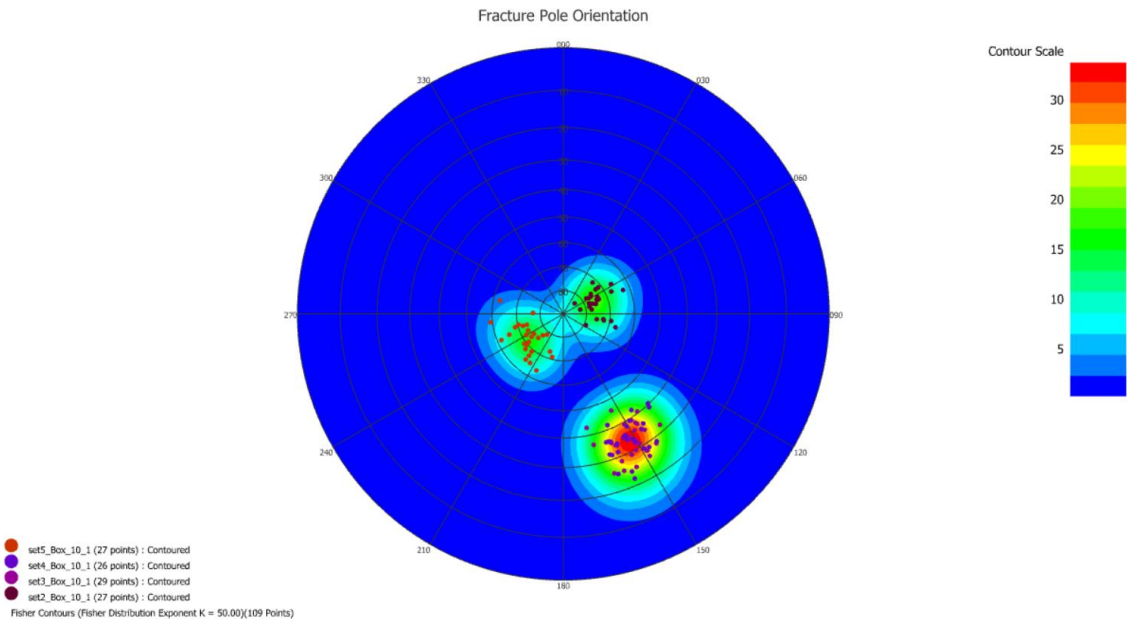
Ilustración 51 Red estereográfica región 8.

Fuente 51 Elaboración propia.



*Ilustración 52 Red estereográfica región 9.*

*Fuente 52 Elaboración propia.*



*Ilustración 53 Red estereográfica región 10.*

*Fuente 53 Elaboración propia.*

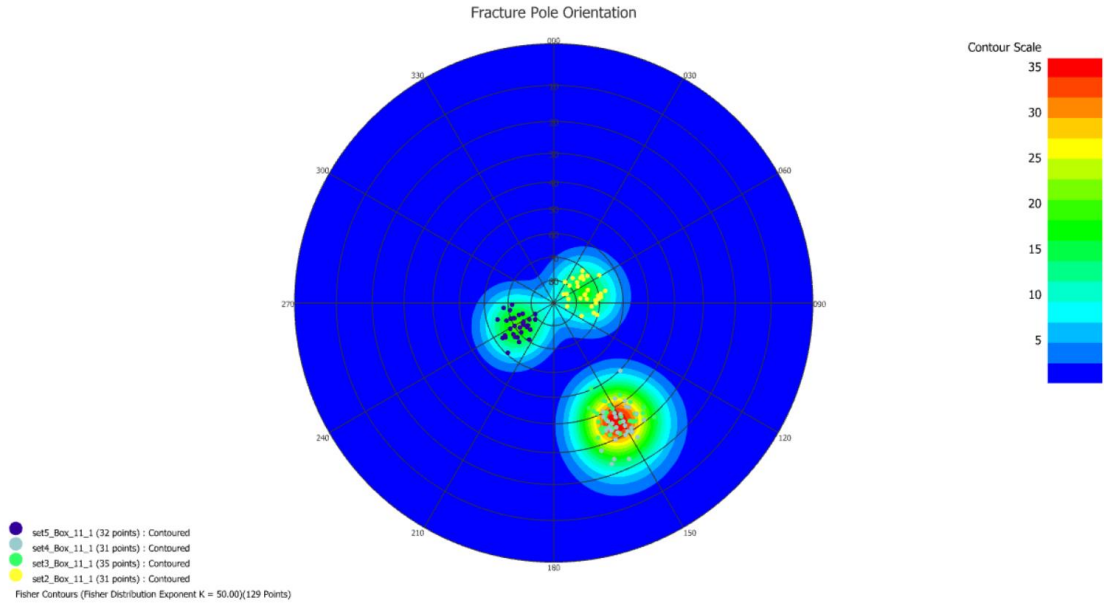


Ilustración 54 Red estereográfica región 11.

Fuente 54 Elaboración propia.

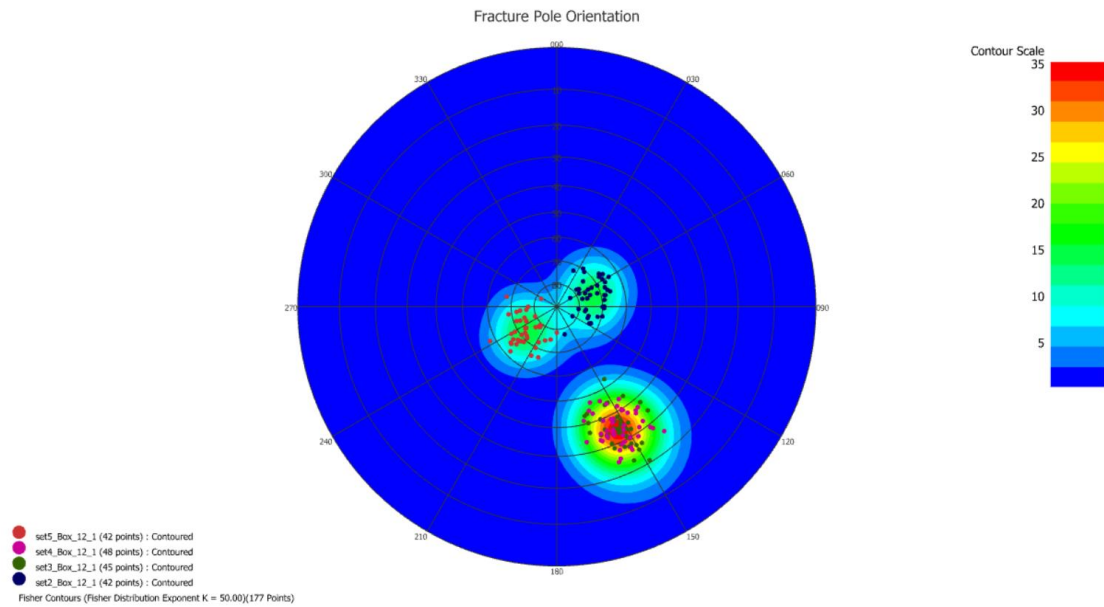
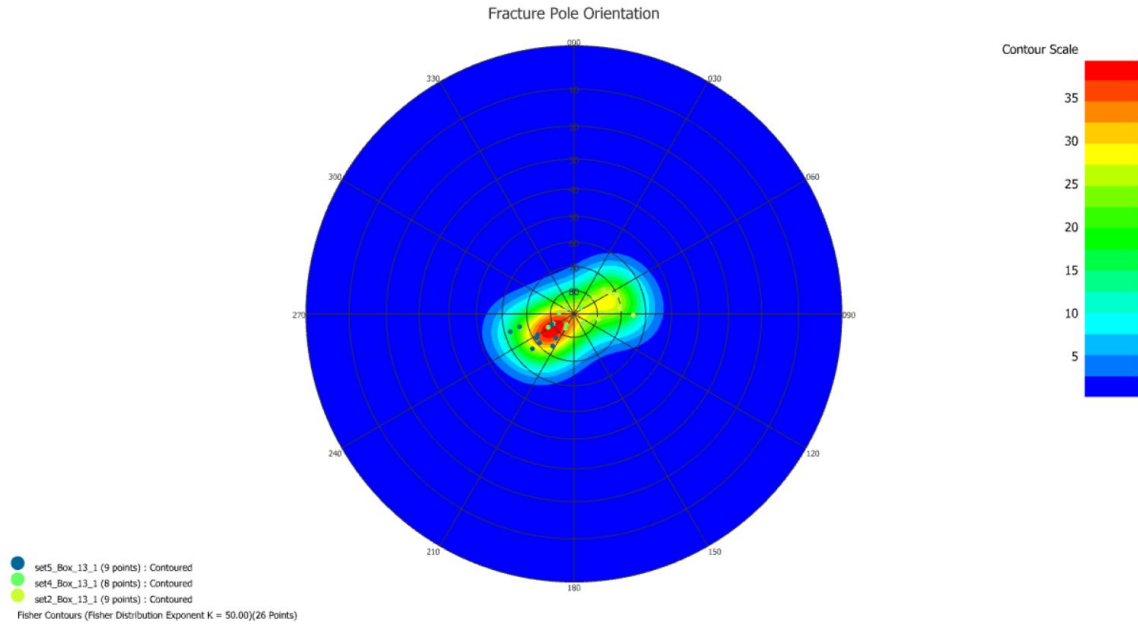


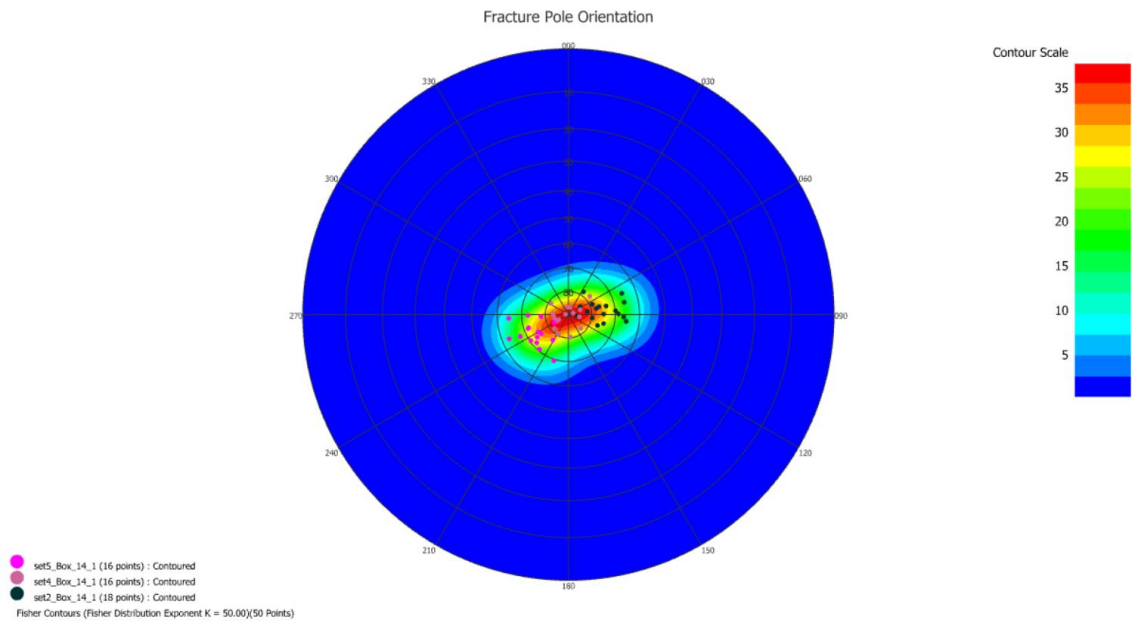
Ilustración 55 Red estereográfica región 12.

Fuente 55 Elaboración propia.



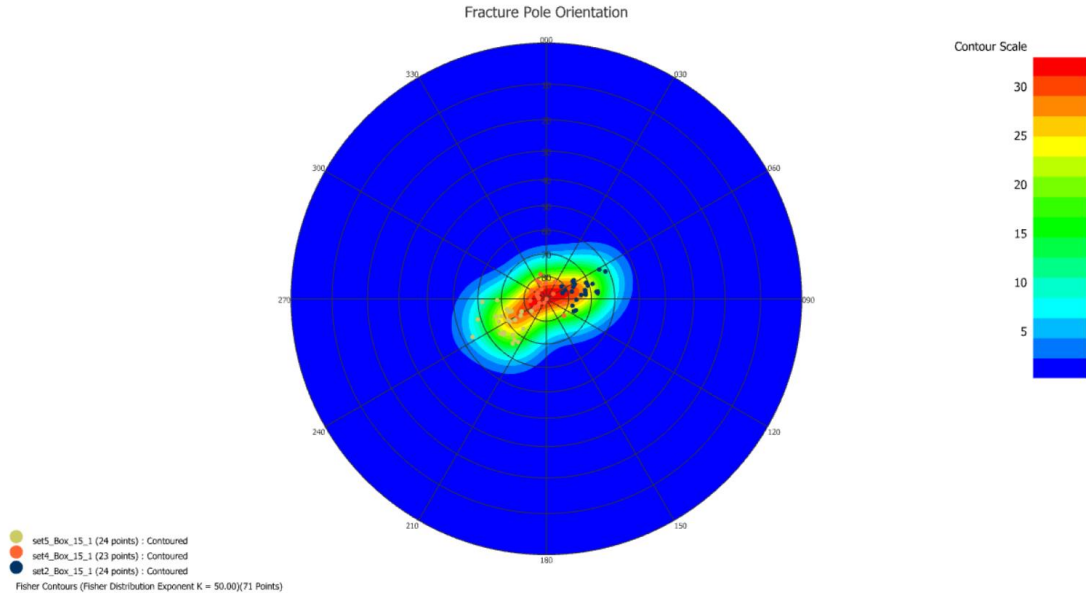
*Ilustración 56 Red estereográfica región 13.*

*Fuente 56 Elaboración propia.*



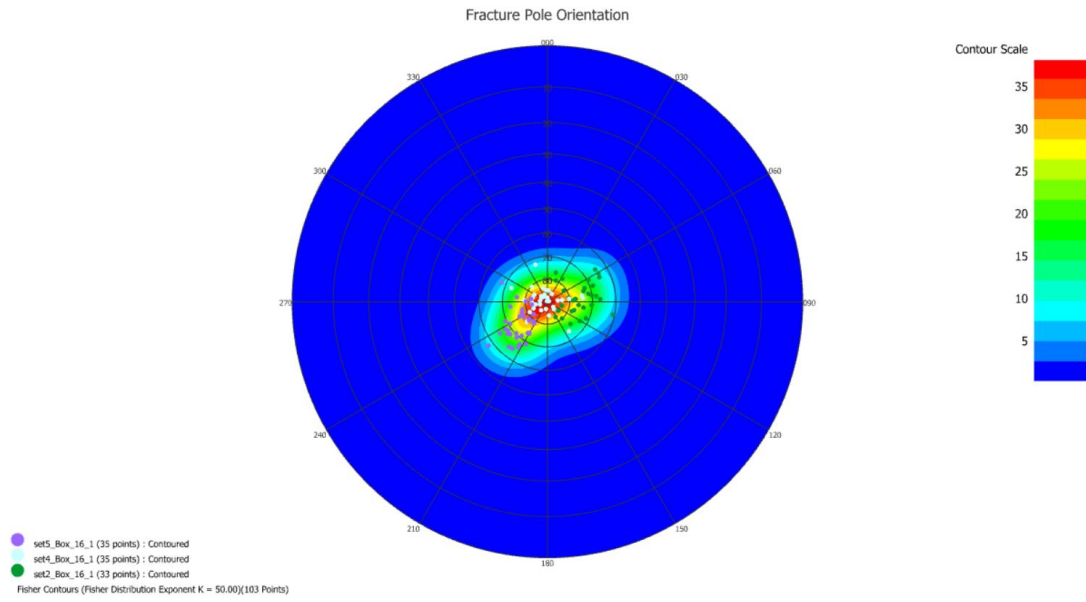
*Ilustración 57 Red estereográfica región 14.*

*Fuente 57 Elaboración propia.*



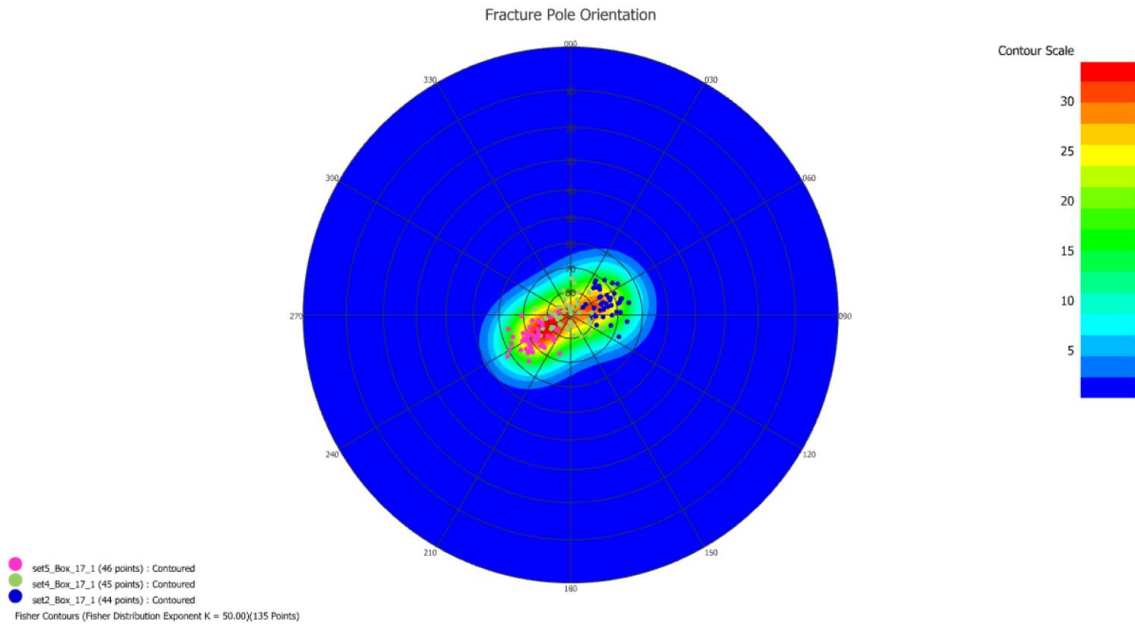
*Ilustración 58 Red estereográfica región 15.*

*Fuente 58 Elaboración propia.*



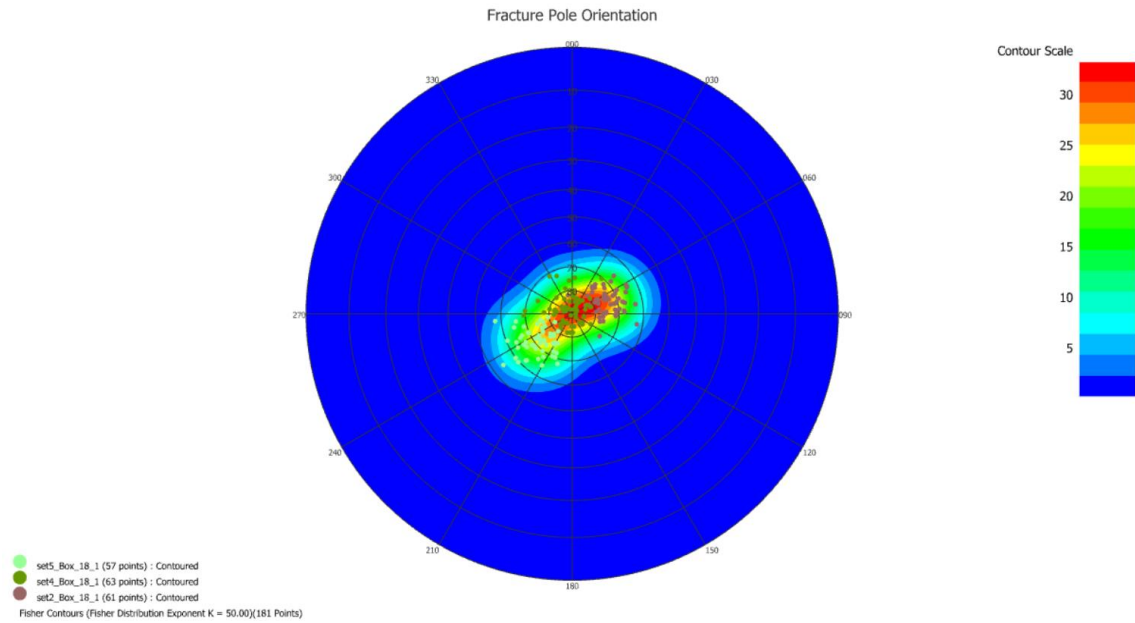
*Ilustración 59 Red estereográfica región 16.*

*Fuente 59 Elaboración propia.*



*Ilustración 60 Red estereográfica región 17.*

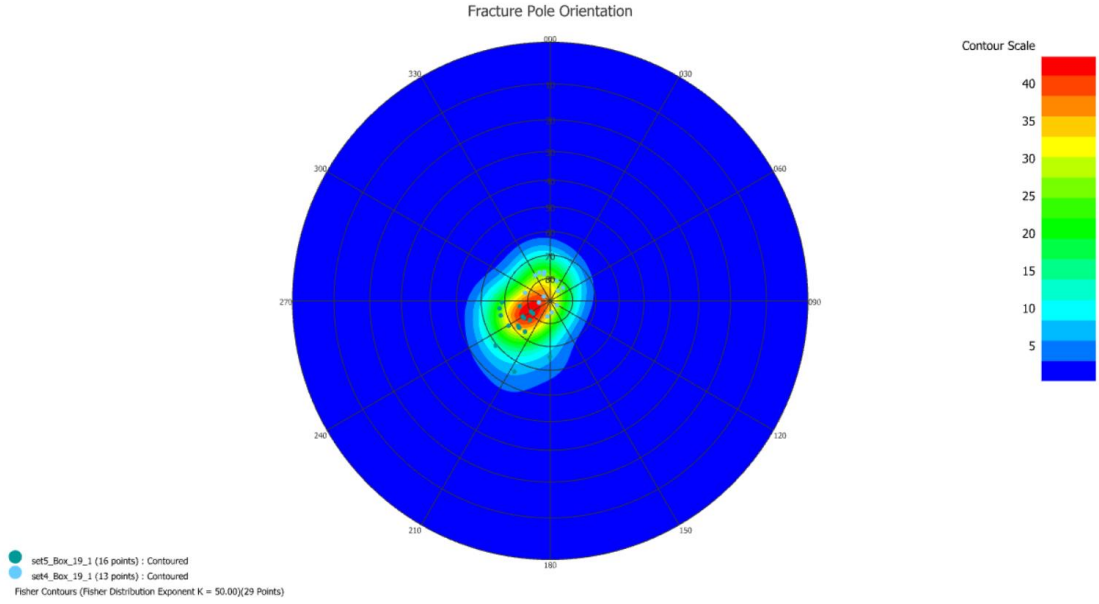
*Fuente 60 Elaboración propia.*



*Ilustración 61 Red estereográfica región 18.*

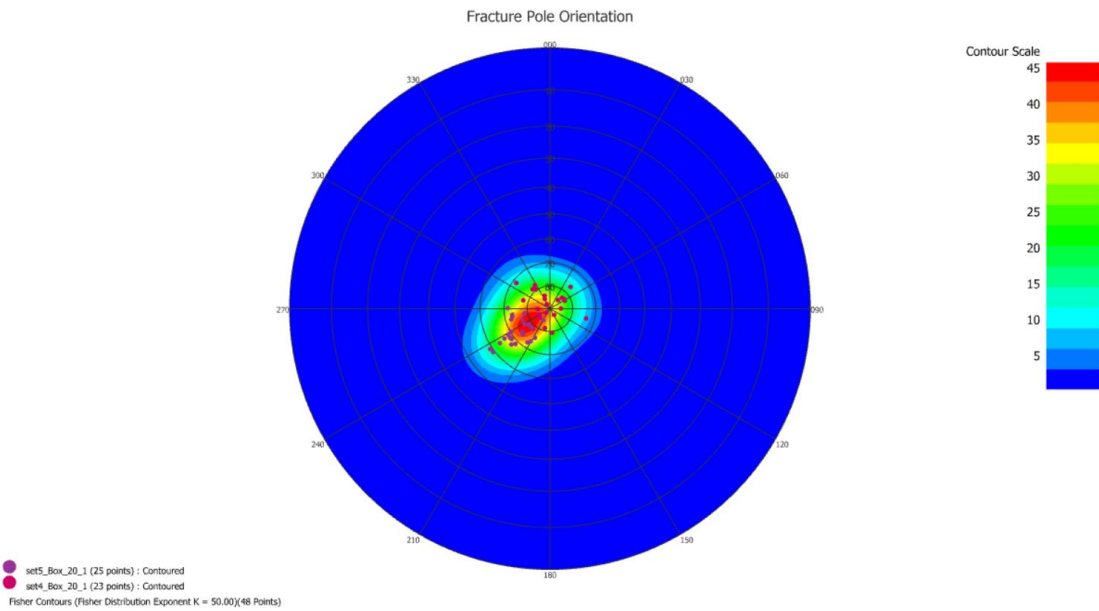
*Fuente 61 Elaboración propia.*





*Ilustración 62 Red estereográfica región 19.*

*Fuente 62 Elaboración propia.*



*Ilustración 63 Red estereográfica región 20.*

*Fuente 63 Elaboración propia.*

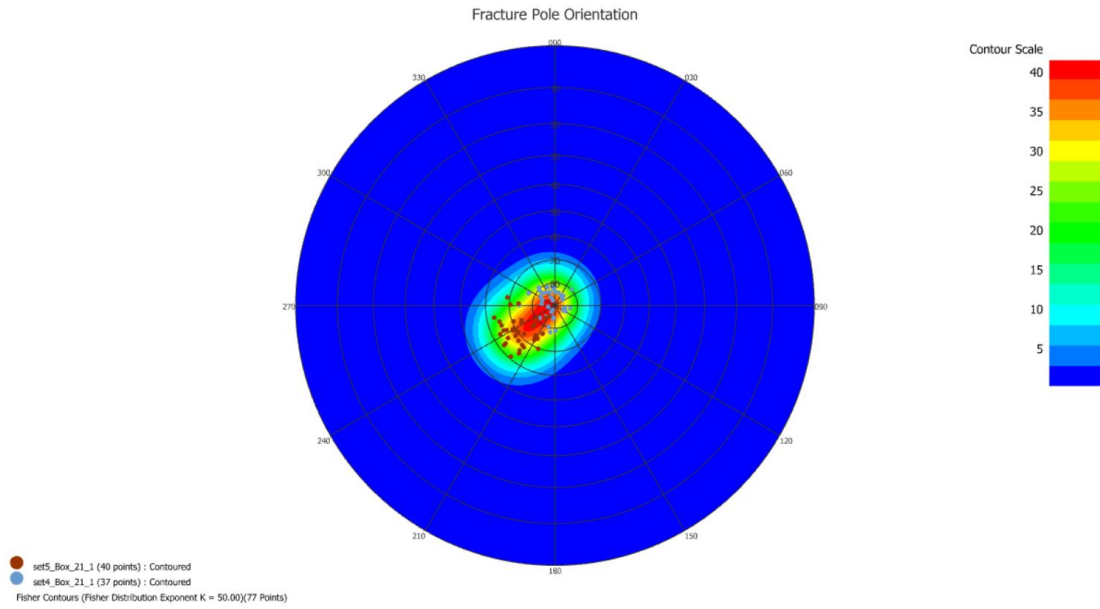


Ilustración 64 Red estereográfica región 21.

Fuente 64 Elaboración propia.

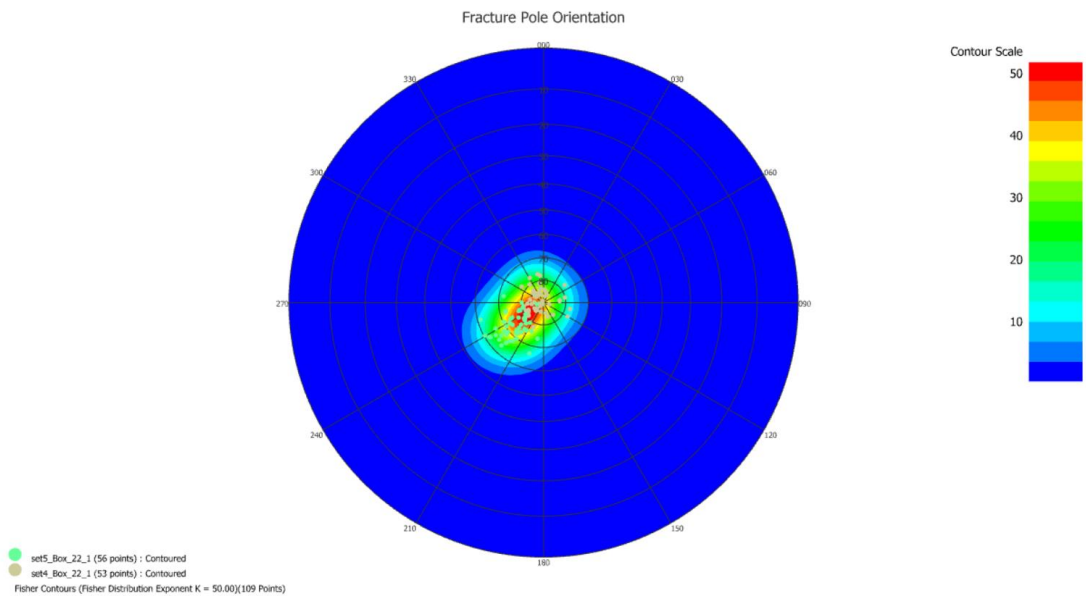


Ilustración 65 Red estereográfica región 22.

Fuente 65 Elaboración propia.



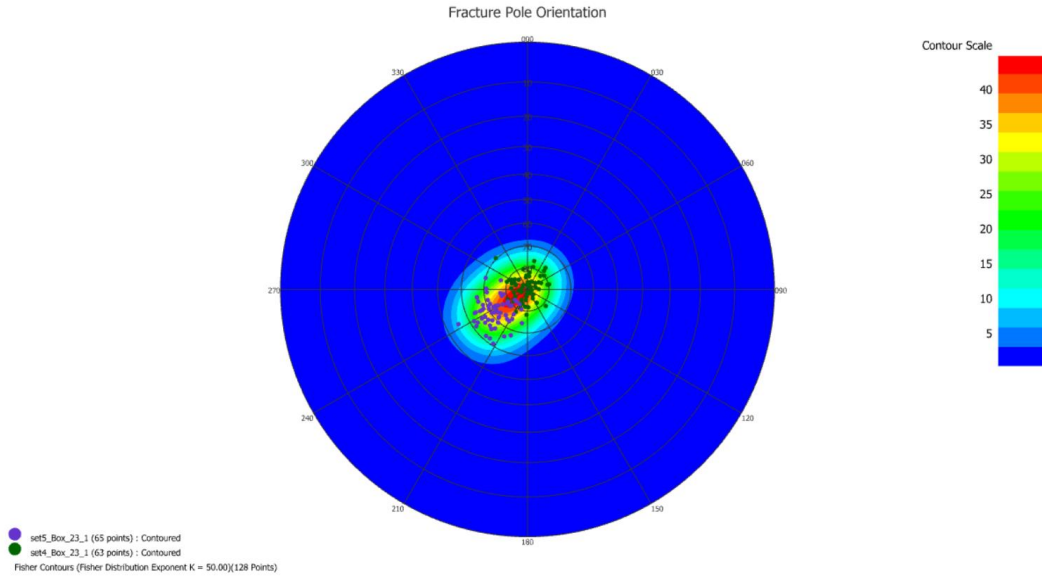


Ilustración 66 Red estereográfica región 23.

Fuente 66 Elaboración propia

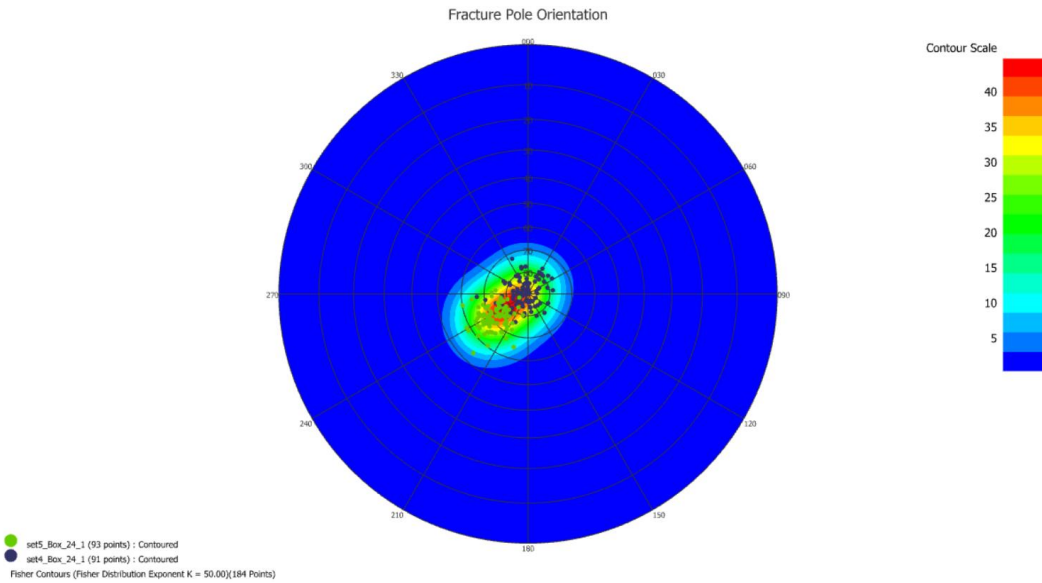
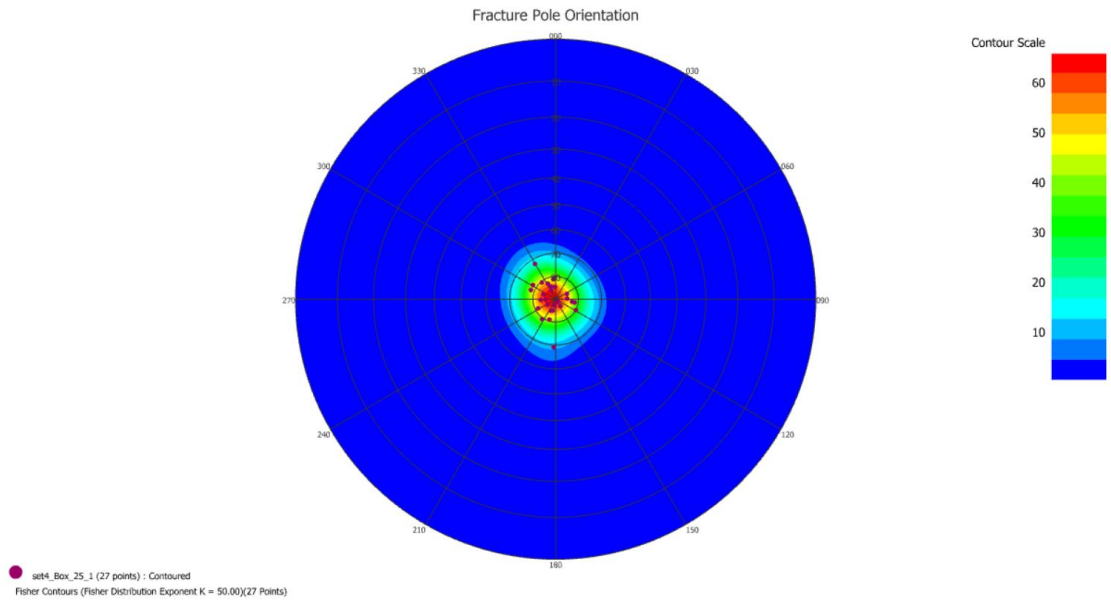


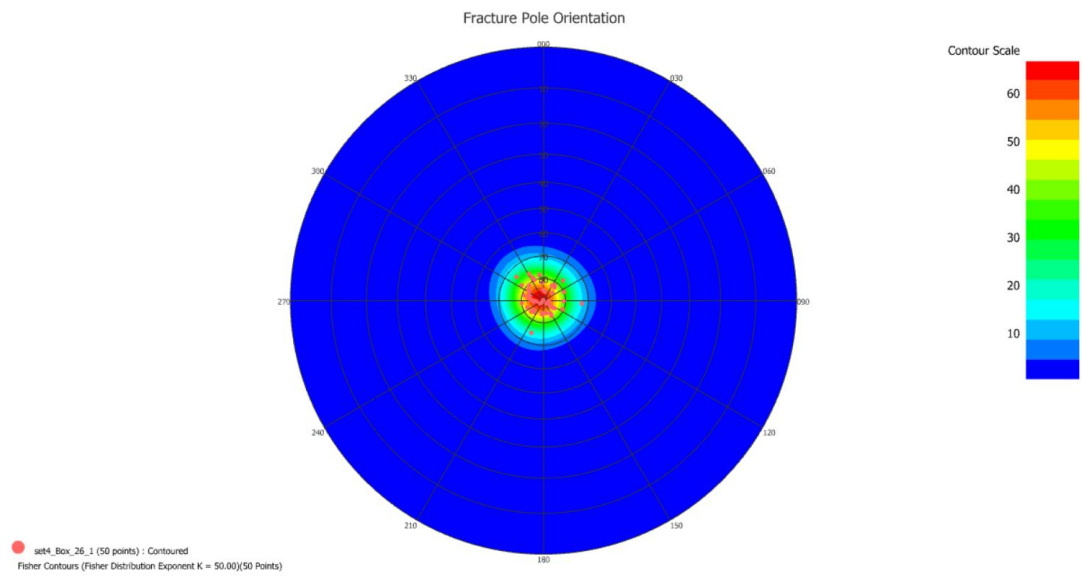
Ilustración 67 Red estereográfica región 24

Fuente 67 Elaboración propia.



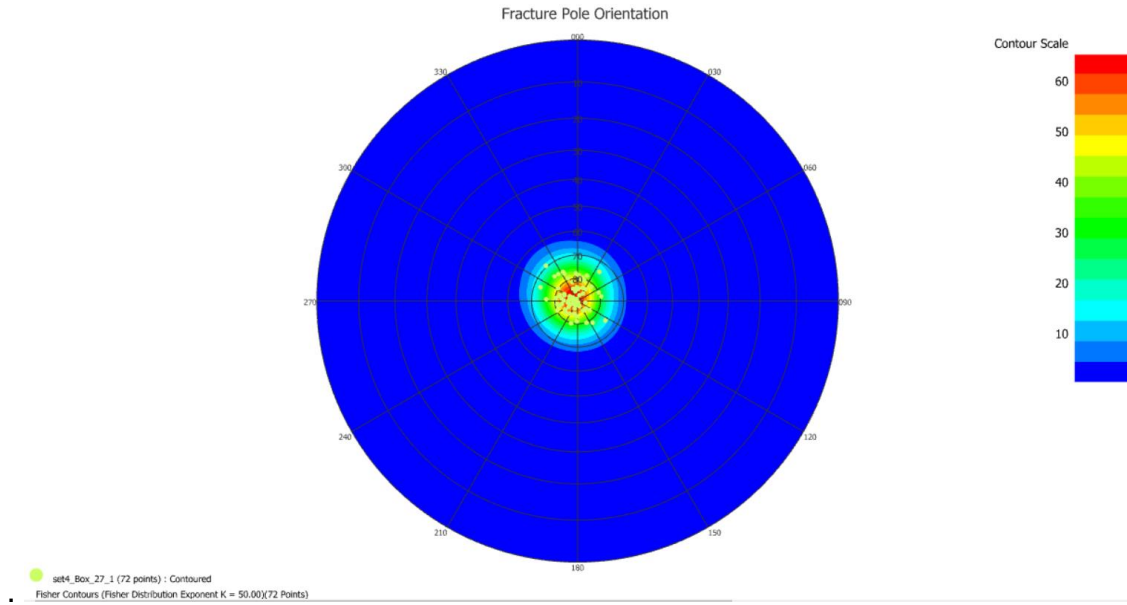
*Ilustración 68 Red estereográfica región 25.*

*Fuente 68 Elaboración propia.*



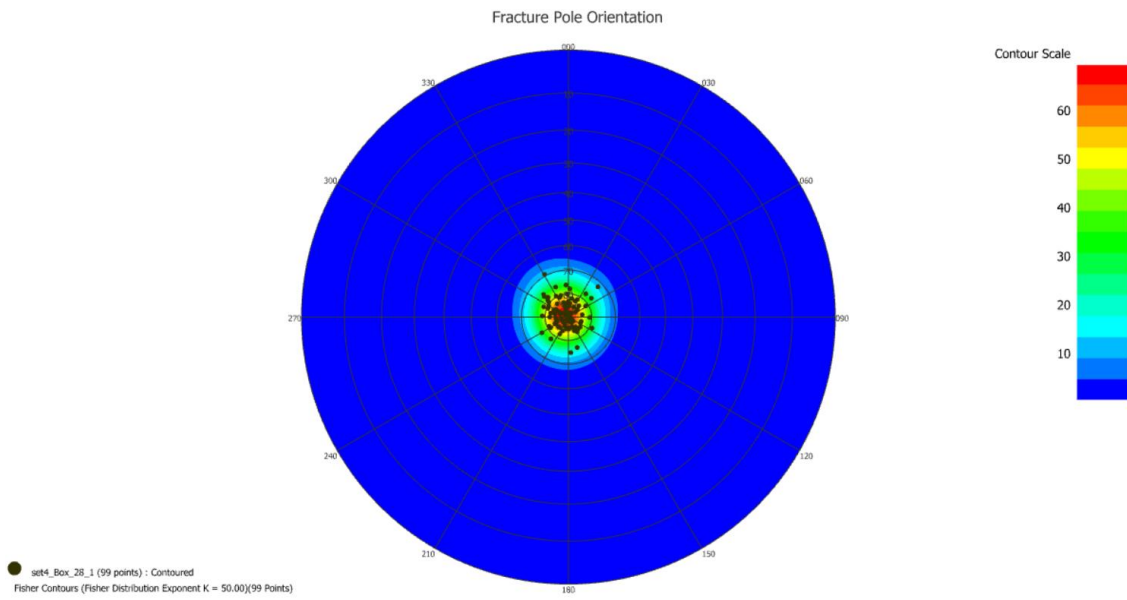
*Ilustración 69 Red estereográfica región 26.*

*Fuente 69 Elaboración propia.*



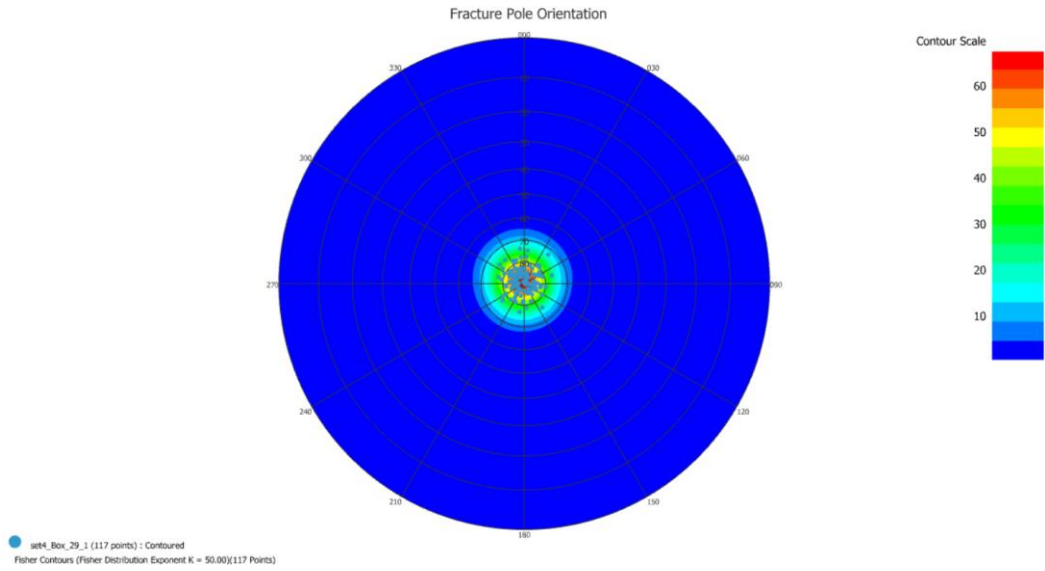
*Ilustración 70 Red estereográfica región 27.*

*Fuente 70 Elaboración propia.*



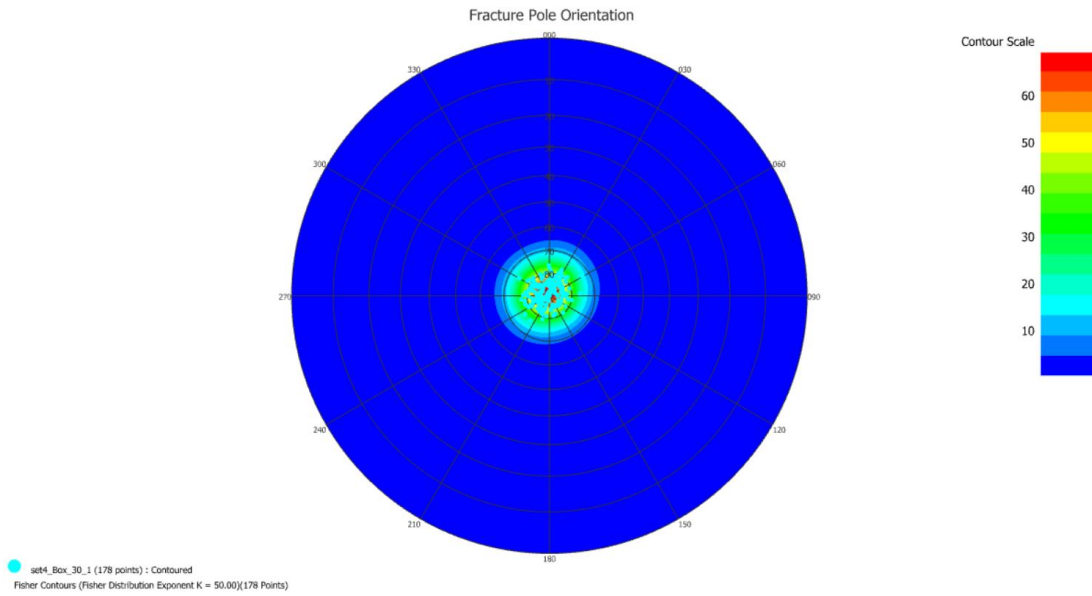
*Ilustración 71 Red estereográfica región 28.*

*Fuente 71 Elaboración propia.*



*Ilustración 72 Red estereográfica región 29.*

*Fuente 72 Elaboración propia.*

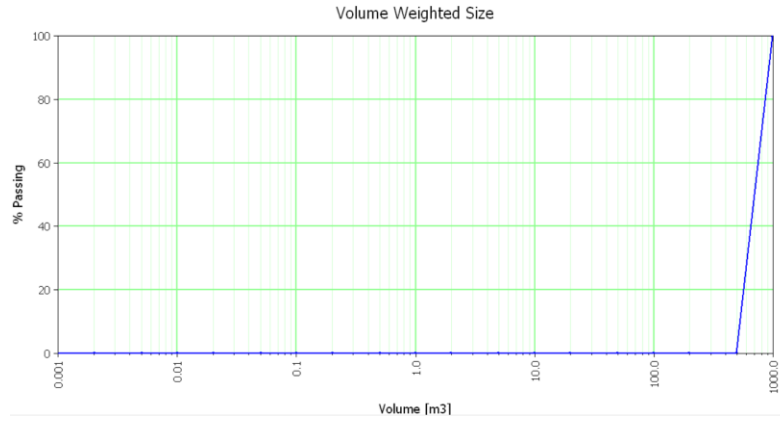


*Ilustración 73 Red estereográfica región 30.*

*Fuente 73 Elaboración propia.*

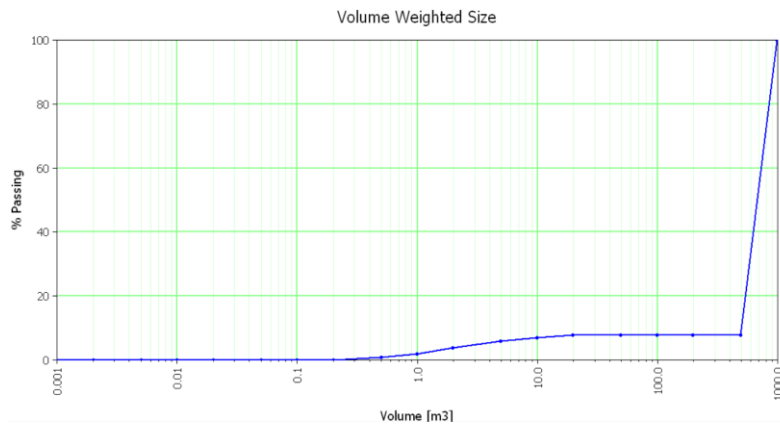
## Anexo B

A continuación, se presentan los resultados de fragmentación para las 30 regiones simuladas, para ello se muestra la curva de fragmentación de cada región.



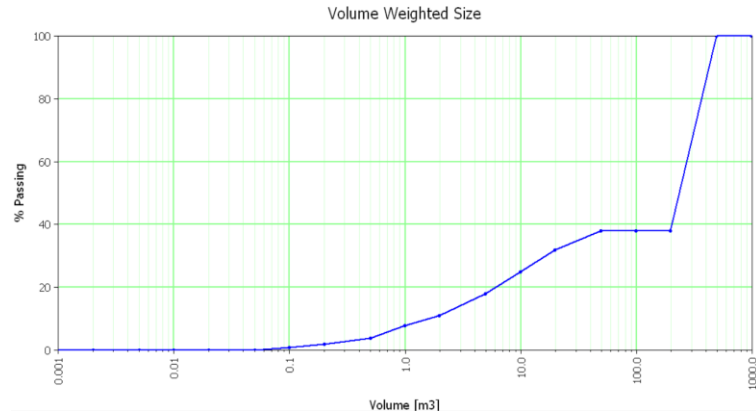
*Ilustración 74 Curva de fragmentación región 1.*

*Fuente 74 Elaboración propia.*



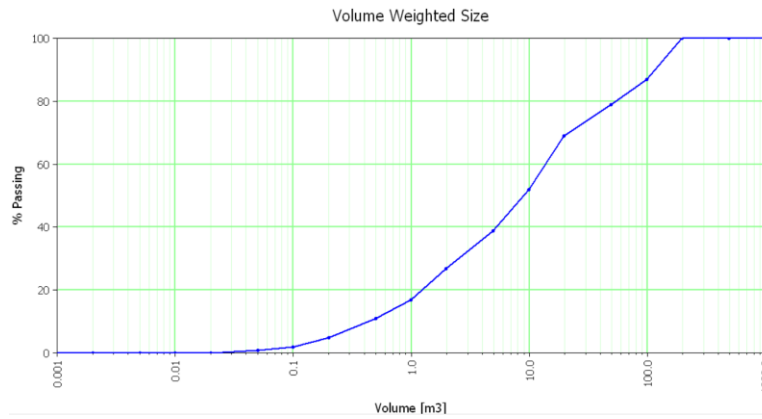
*Ilustración 75 Curva de fragmentación región 2.*

*Fuente 75 Elaboración propia.*



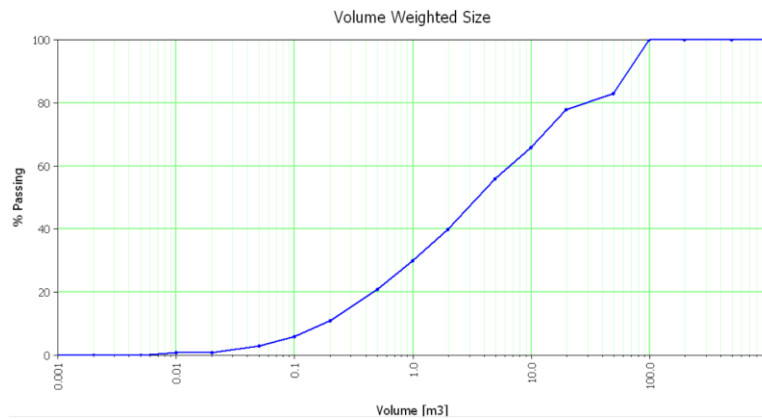
*Ilustración 76 Curva de fragmentación región 3.*

*Fuente 76 Elaboración propia.*



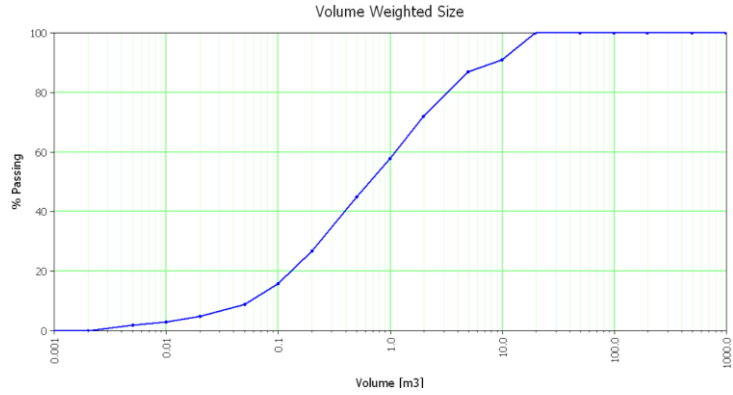
*Ilustración 77 Curva de fragmentación región 4.*

*Fuente 77 Elaboración propia.*



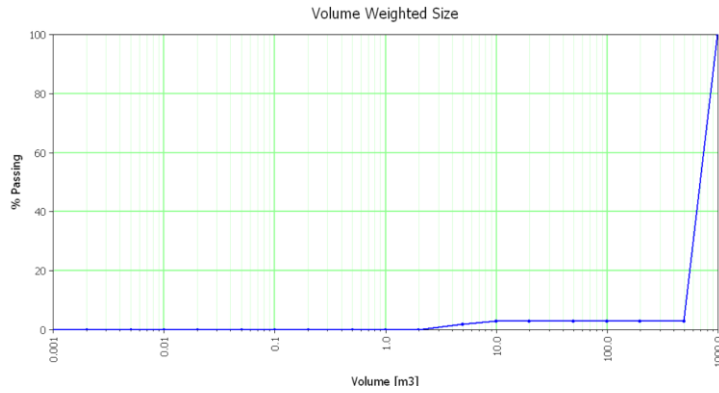
*Ilustración 78 Curva de fragmentación región 5.*

*Fuente 78 Elaboración propia.*



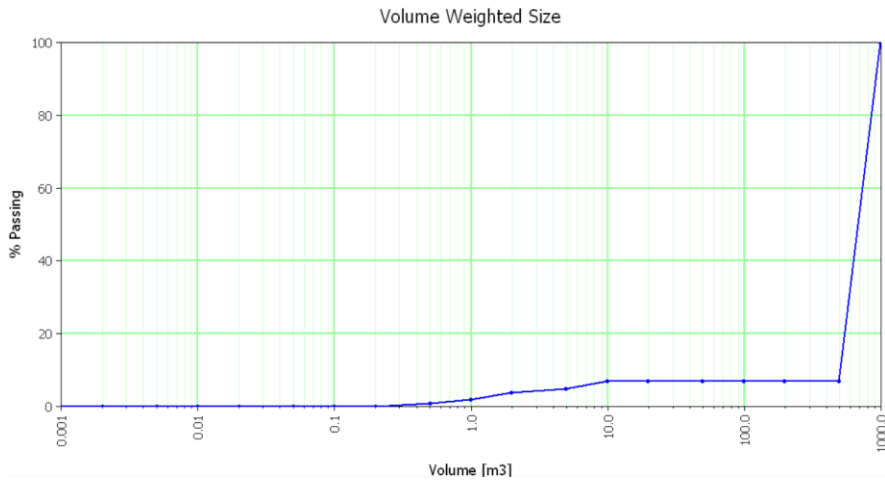
*Ilustración 79 Curva de fragmentación región 6.*

*Fuente 79 Elaboración propia.*



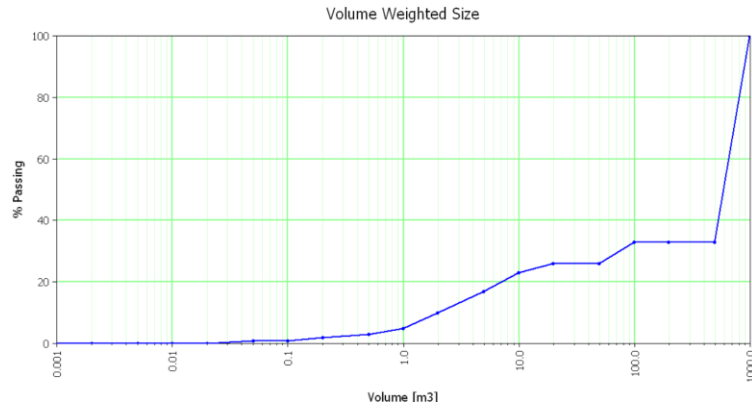
*Ilustración 80 Curva de fragmentación región 7.*

*Fuente 80 Elaboración propia.*



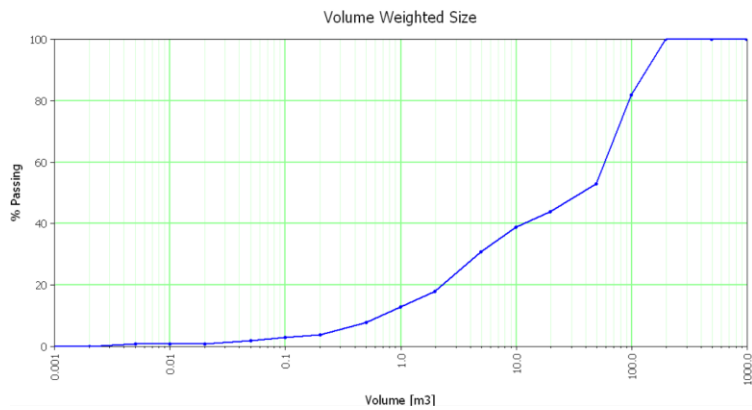
*Ilustración 81 Curva de fragmentación región 8.*

*Fuente 81 Elaboración propia.*



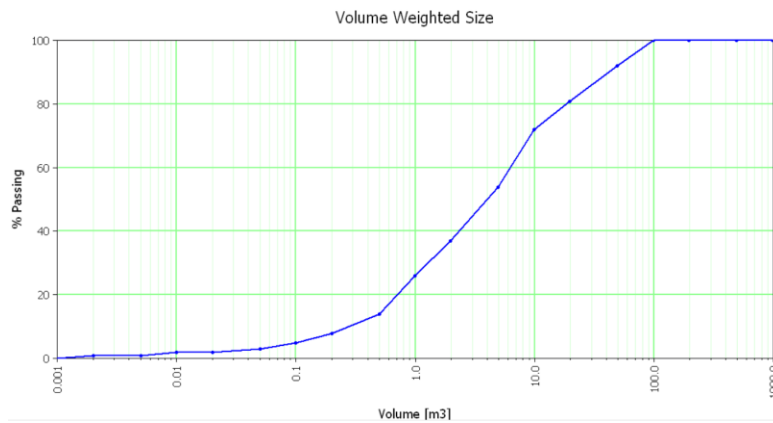
*Ilustración 82 Curva de fragmentación región 9.*

*Fuente 82 Elaboración propia.*



*Ilustración 83 Curva de fragmentación región 10.*

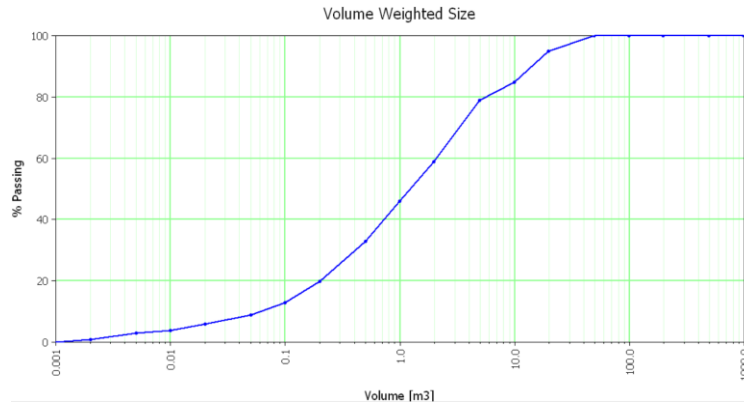
*Fuente 83 Elaboración propia.*



*Ilustración 84 Curva de fragmentación región 11.*

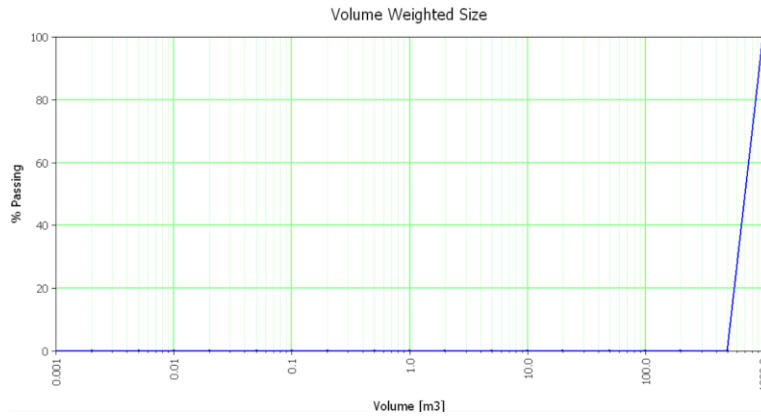
*Fuente 84 Elaboración propia.*





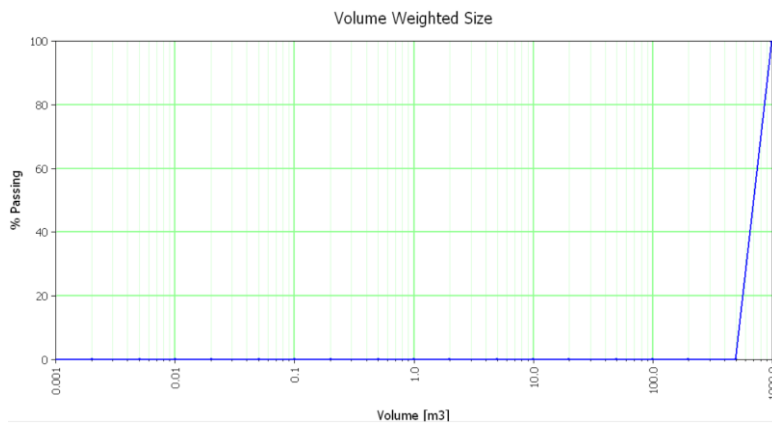
*Ilustración 85 Curva de fragmentación región 12.*

*Fuente 85 Elaboración propia.*



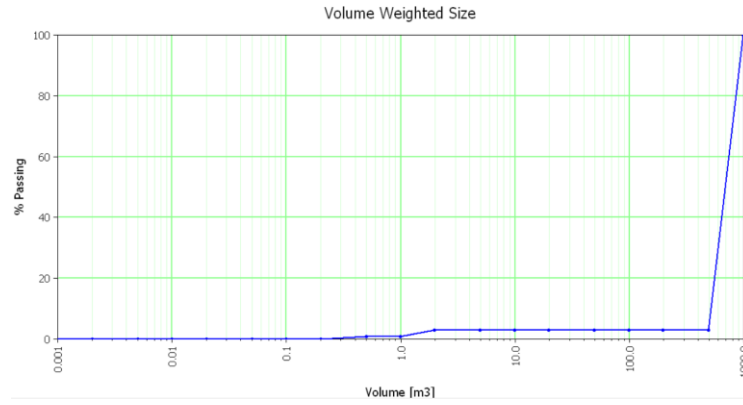
*Ilustración 86 Curva de fragmentación región 13.*

*Fuente 86 Elaboración propia,*



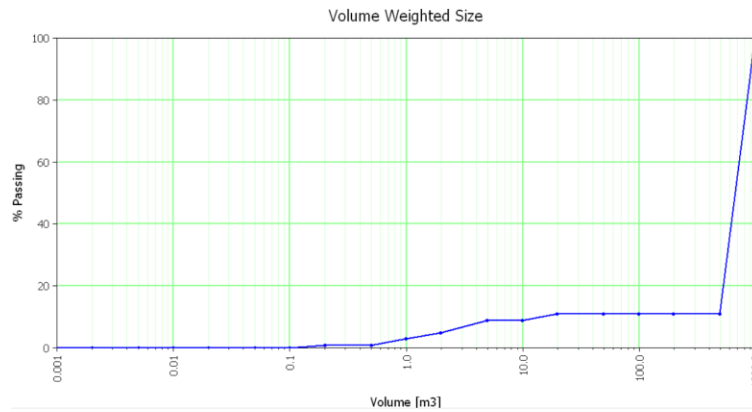
*Ilustración 87 Curva de fragmentación región 14.*

*Fuente 87 Elaboración propia.*



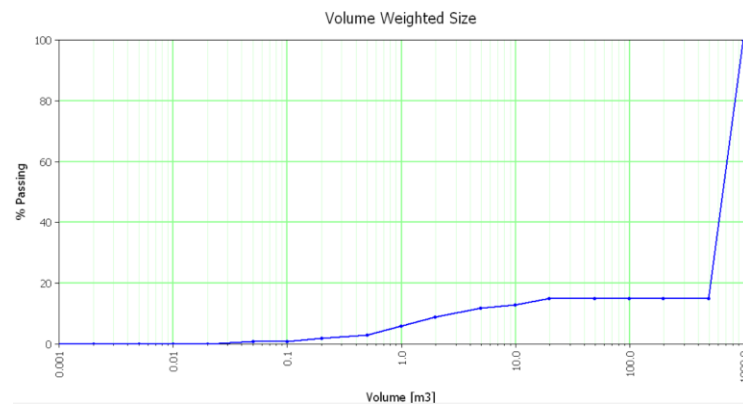
*Ilustración 88 Curva de fragmentación región 15.*

*Fuente 88 Elaboración propia.*



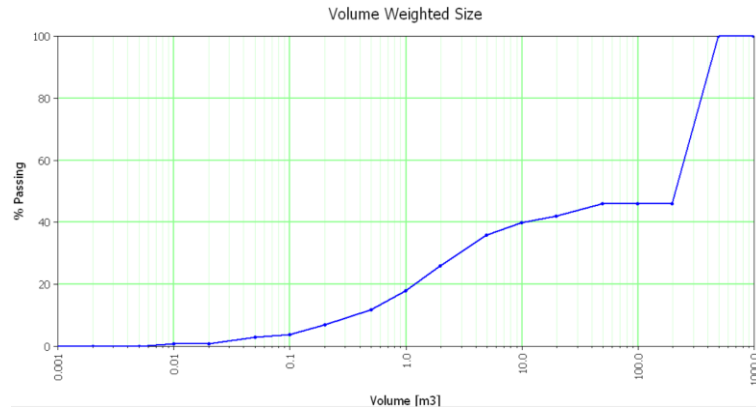
*Ilustración 89 Curva de fragmentación región 16.*

*Fuente 89 Elaboración propia.*



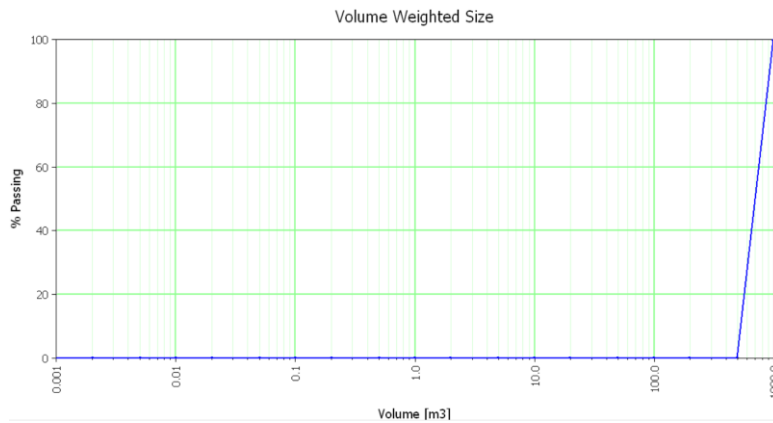
*Ilustración 90 Curva de fragmentación región 17.*

*Fuente 90 Elaboración propia.*



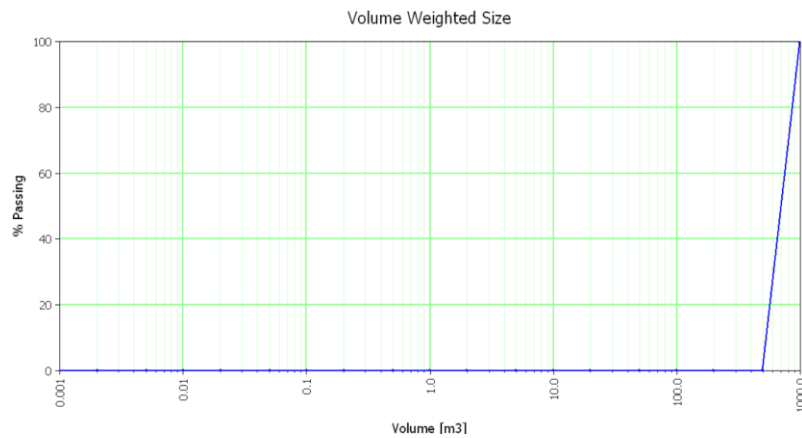
*Ilustración 91 Curva de fragmentación región 18.*

*Fuente 91 Elaboración propia.*



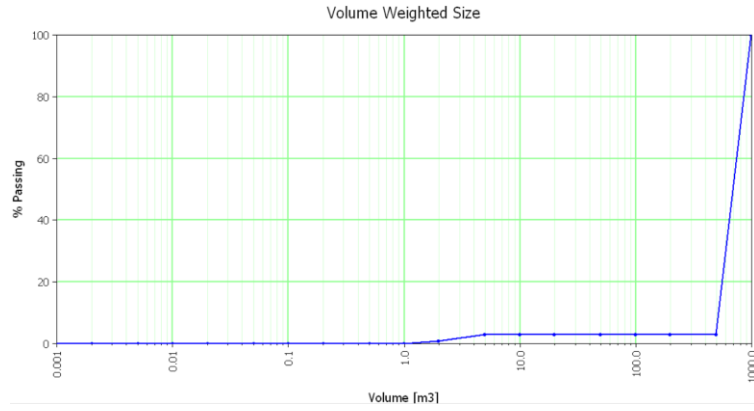
*Ilustración 92 Curva de fragmentación región 19.*

*Fuente 92 Elaboración propia.*



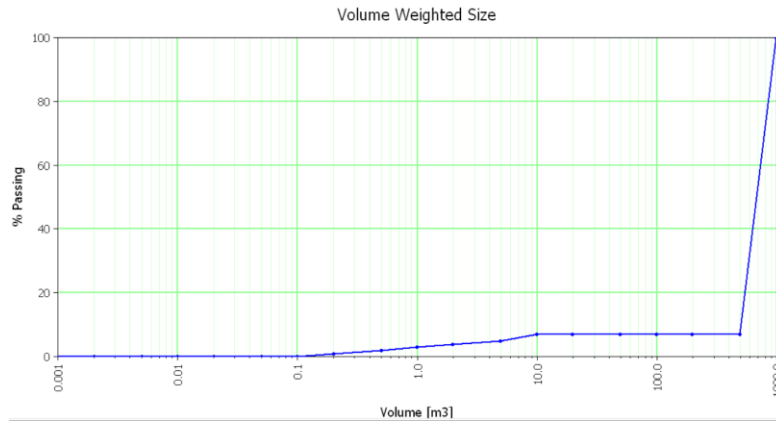
*Ilustración 93 Curva de fragmentación región 20.*

*Fuente 93 Elaboración propia.*



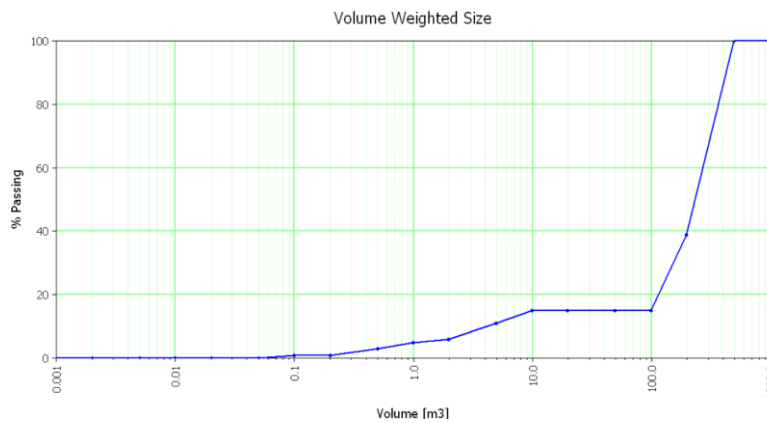
*Ilustración 94 Curva de fragmentación región 21.*

*Fuente 94 Elaboración propia.*



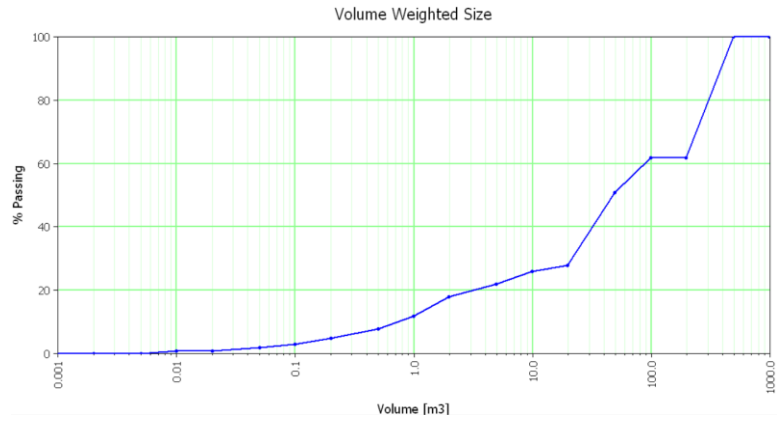
*Ilustración 95 Curva de fragmentación región 22.*

*Fuente 95 Elaboración propia.*



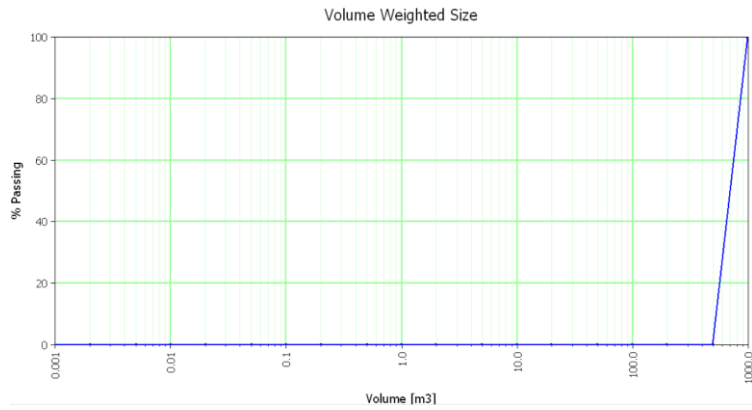
*Ilustración 96 Curva de fragmentación región 23.*

*Fuente 96 Elaboración propia.*



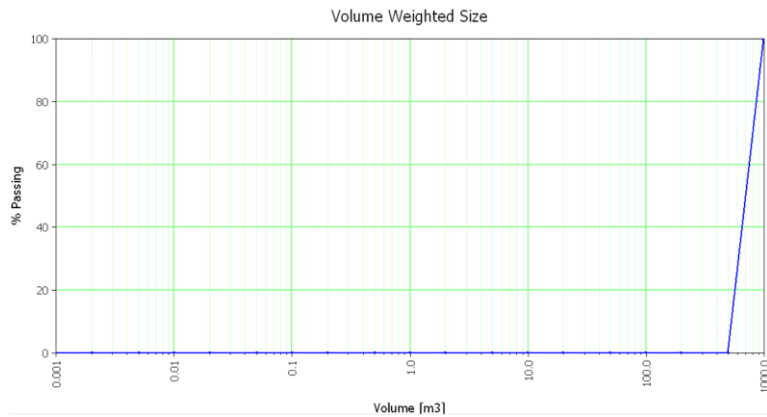
*Ilustración 97 Curva de fragmentación región 24.*

*Fuente 97 Elaboración propia.*



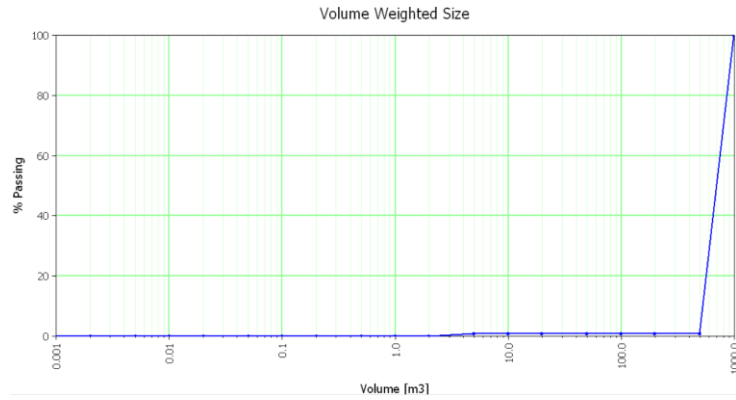
*Ilustración 98 Curva de fragmentación región 25.*

*Fuente 98 Elaboración propia.*



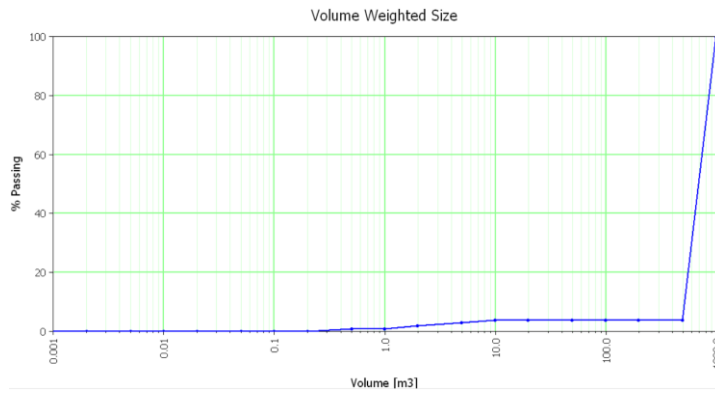
*Ilustración 99 Curva de fragmentación región 26.*

*Fuente 99 Elaboración propia.*



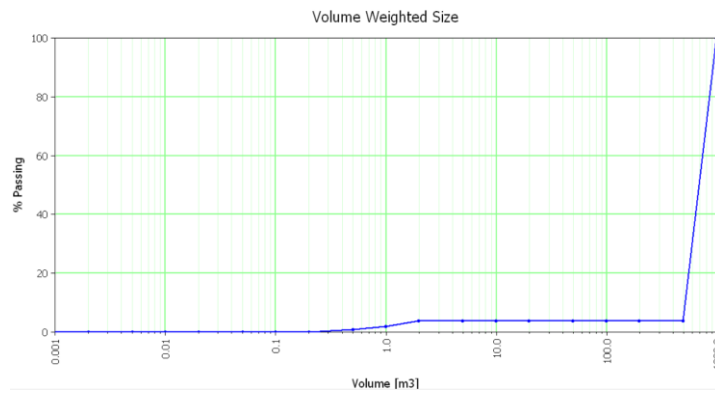
*Ilustración 100 Curva de fragmentación región 27.*

*Fuente 100 Elaboración propia.*



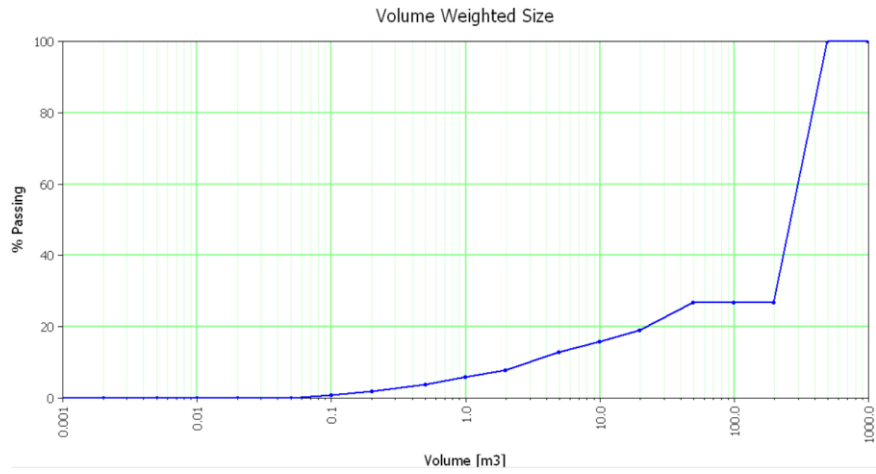
*Ilustración 101 Curva de fragmentación región 28.*

*Fuente 101 Elaboración propia.*



*Ilustración 102 Curva de fragmentación región 29.*

*Fuente 102 Elaboración*



*Ilustración 103 Curva de fragmentación región 30.*

*Fuente 103 Elaboración propia.*

## Anexo C

Con el objetivo de ilustrar la influencia que tiene la Circular Variance en la estabilidad de las Cuñas para valores de P32 altos, en esta sección se presentan los resultados de los análisis de estabilidad de cuñas para las 30 regiones simuladas,

Tabla 14 Efecto de la Circular Variance en la estabilidad de las cuñas.

P32	Circular Variance	Total wedges	Stable	Unstable	Free fall
1	0.770				
1	0.572	5	5	0	0
1	0.505	1	1	0	0
1	0.511	2	2	0	0
1	0.013				
2	0.776	33	33	0	0
2	0.704	55	48	0	7
2	0.678	5	5	0	0
2	0.509				
2	0.012	1	1	0	0
3	0.809	48	47	1	0
3	0.919	65	64	0	1
3	0.688	23	23	0	0
3	0.511	17	17	0	0
3	0.008	9	9	0	0
4	0.850	86	77	2	7
4	0.784	145	137	0	8
4	0.676	42	42	0	0
4	0.509	6	6	0	0
4	0.010	15	14	0	1
5	0.816	270	259	5	6
5	0.848	262	253	0	9
5	0.680	117	117	0	0
5	0.507	38	38	0	0
5	0.007	30	30	0	0
7	0.847	645	624	6	15
7	0.778	704	684	3	17
7	0.679	170	164	0	6
7	0.509	66	66	0	0
7	0.008	78	76	0	2



## Anexo D

En esta sección se muestran los resultados del cálculo de la variable Circular Variance, versus número de cuñas, volumen medio y número de bloques.

Tabla 15 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.

P32 = 1 / P32 estimado = 1.0 (Hekmatnejad,2018)				
N° sets	N° cuñas	Volumen medio m <sup>3</sup>	N° de bloques	Circular Variance
5		1.4159292	159	0.770
4	5	12.325879	565	0.572
3	1	11.1111111	72	0.605
2	2	17.391304	46	0.511
1		72.727273	11	0.013

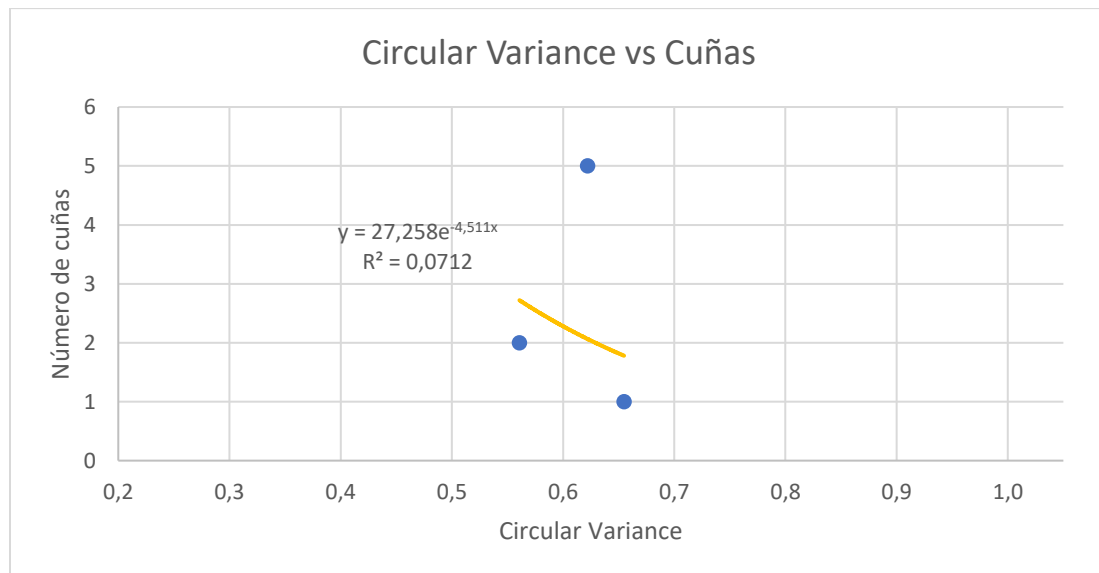


Ilustración 104 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.

Fuente 104 Elaboración propia.

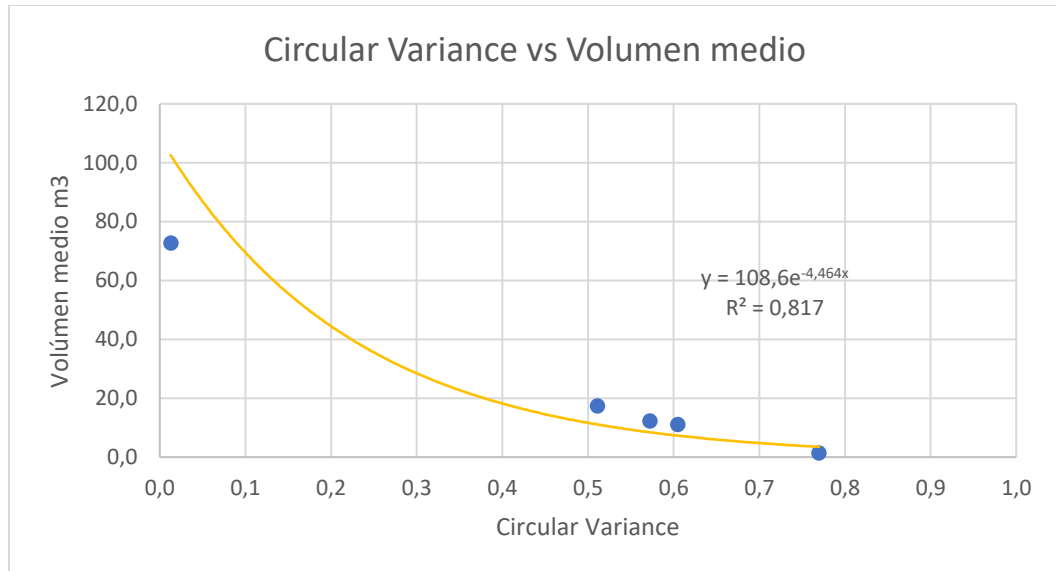


Ilustración 105 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio.

Fuente 105 Elaboración propia.

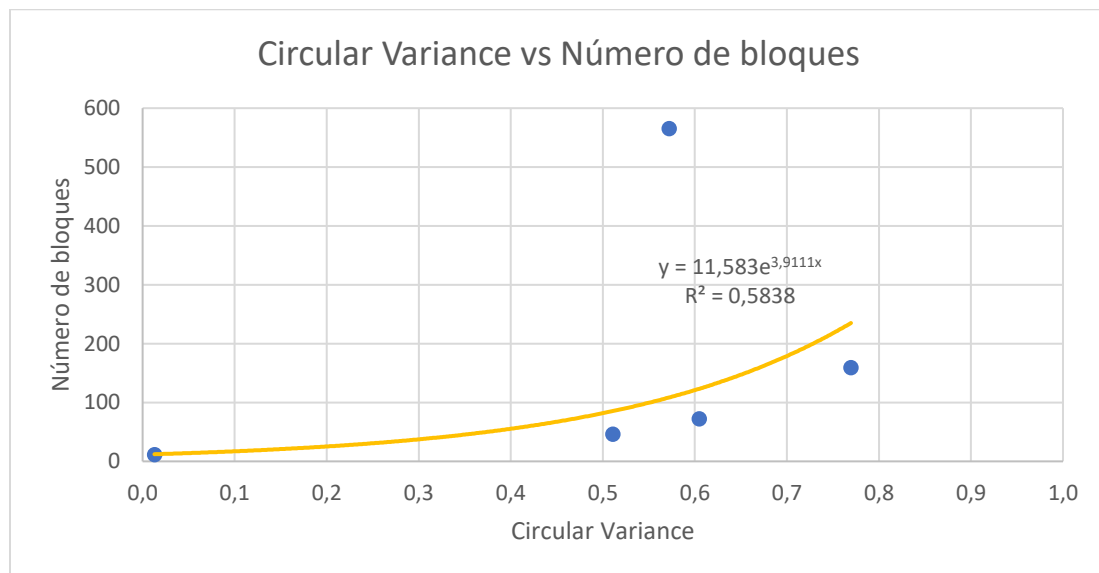


Ilustración 106 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.

Fuente 106 Elaboración propia.

Tabla 16 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia.

P32 = 2 / P32 estimado = 2.1 (Hekmatnejad,2018)				
Nº sets	Nº cuñas	Volumen medio m <sup>3</sup>	Nº de bloques	Circular Variance
5	33	1.2158055	658	0.736
4	55	0.43431053	1842	0.804
3	5	2.5712397	218	0.678
2		3.6697248	72	0.509
1	1	22.222222	36	0.012

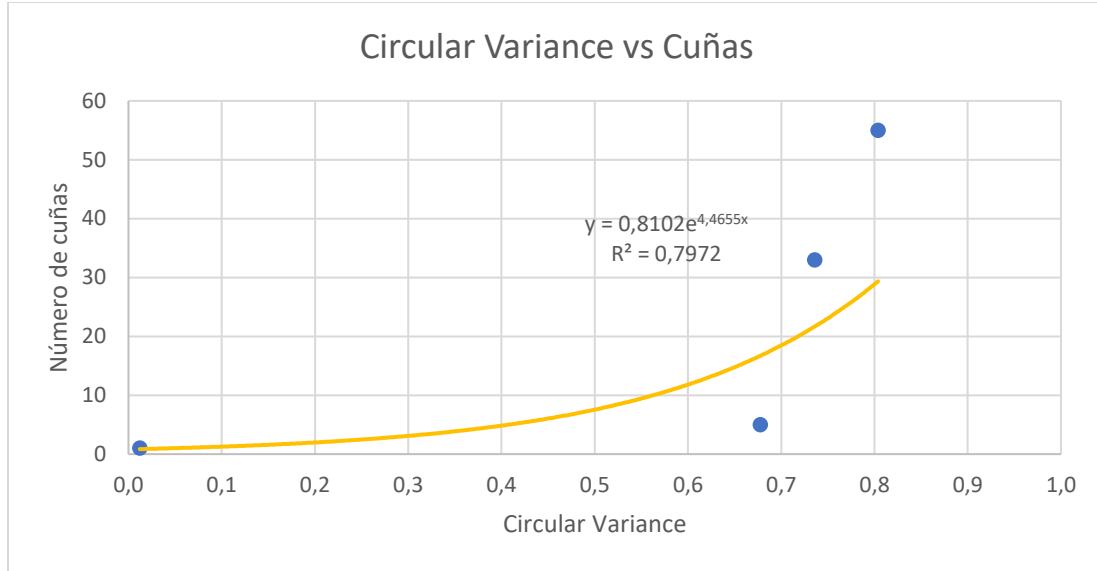


Ilustración 107 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.

Fuente 107 Elaboración propia.

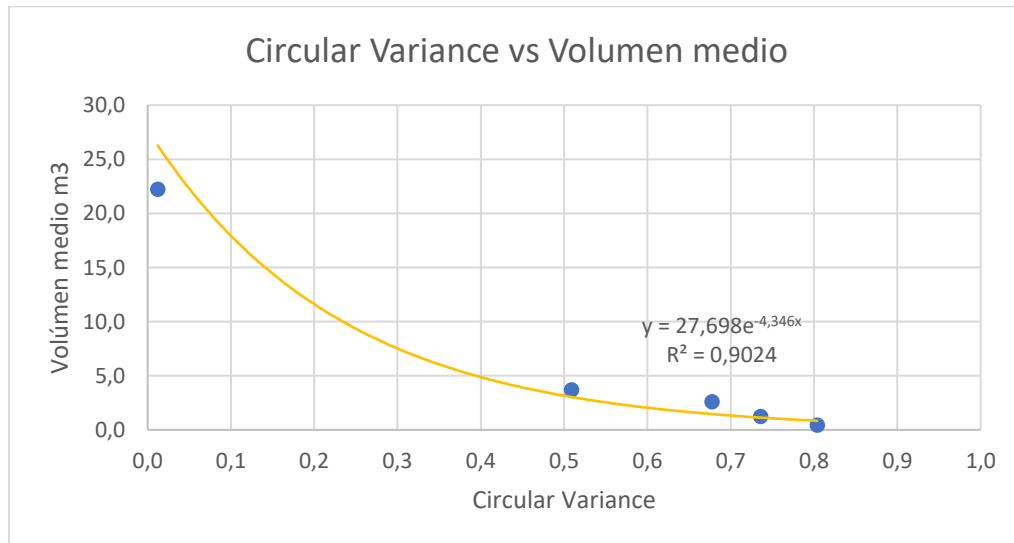


Ilustración 108 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio.

Fuente 108 Elaboración propia.

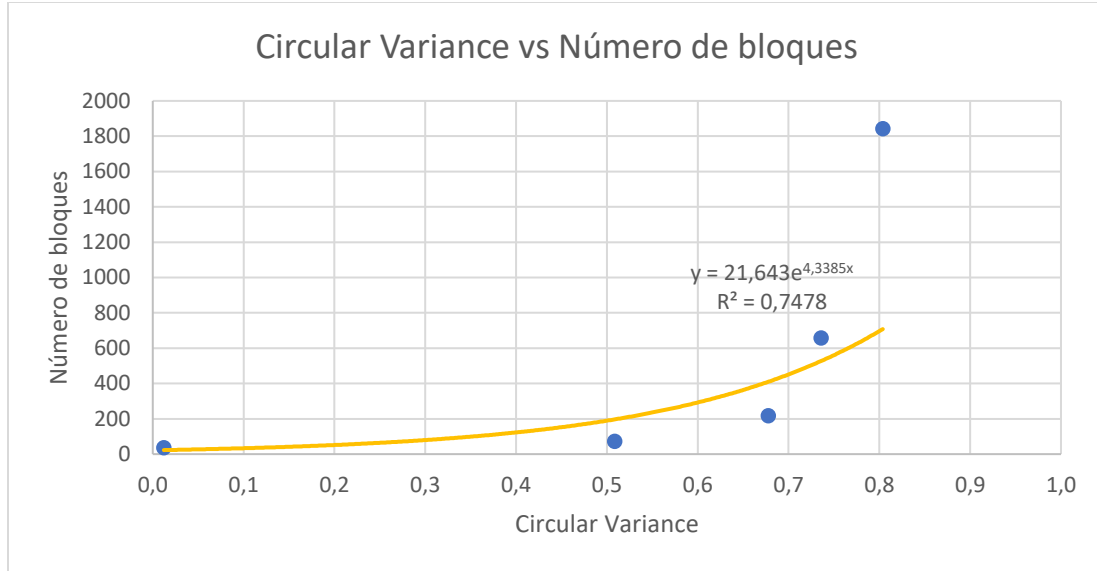
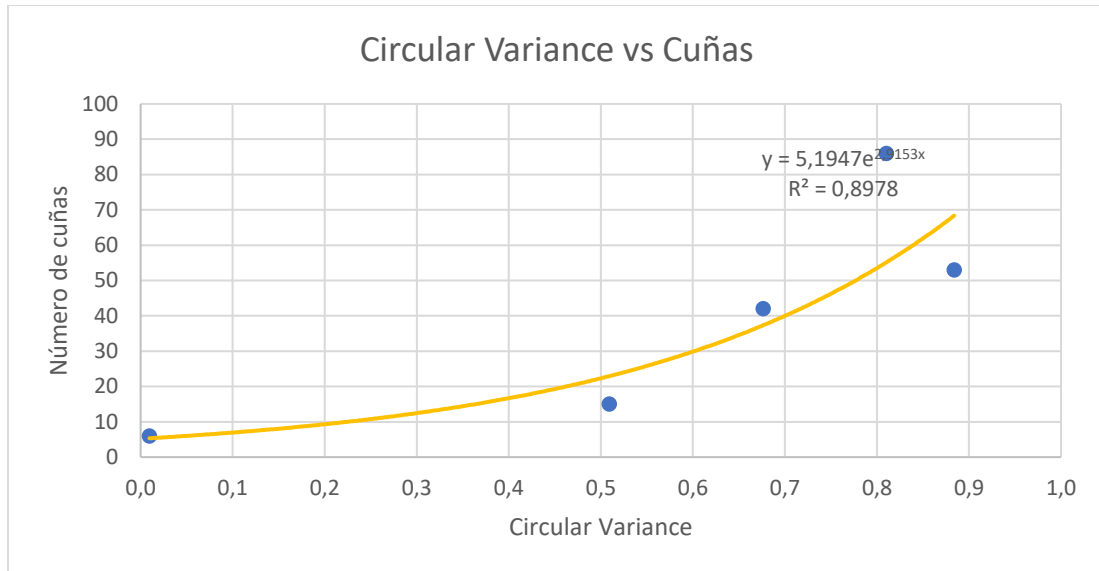


Ilustración 109 Gráfico Circular Variance vs número de bloques

Fuente 109 Elaboración propia.

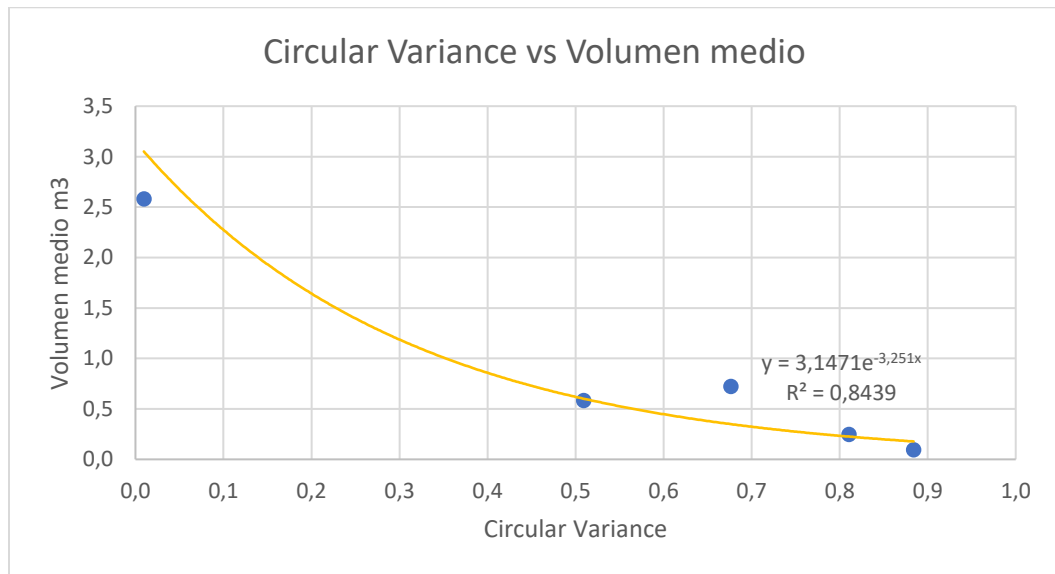
Tabla 17 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia

P32 = 4 / P32 estimado = 4.2 (Hekmatnejad,2018)				
N° sets	N° cuñas	Volumen medio m <sup>3</sup>	N° de bloques	Circular Variance
5	86	0.24691358	3240	0.810
4	53	0.095762509	8354	0.884
3	42	0.72267389	1371	0.676
2	15	0.58351568	1107	0.509
1	6	2.5806452	310	0.010



*Ilustración 110 Gráfico Circular Variance vs número de cuñas.*

*Fuente 110 Elaboración propia.*



*Ilustración 111 Gráfico Circular Variance vs volumen medio.*

*Fuente 111 Elaboración propia.*

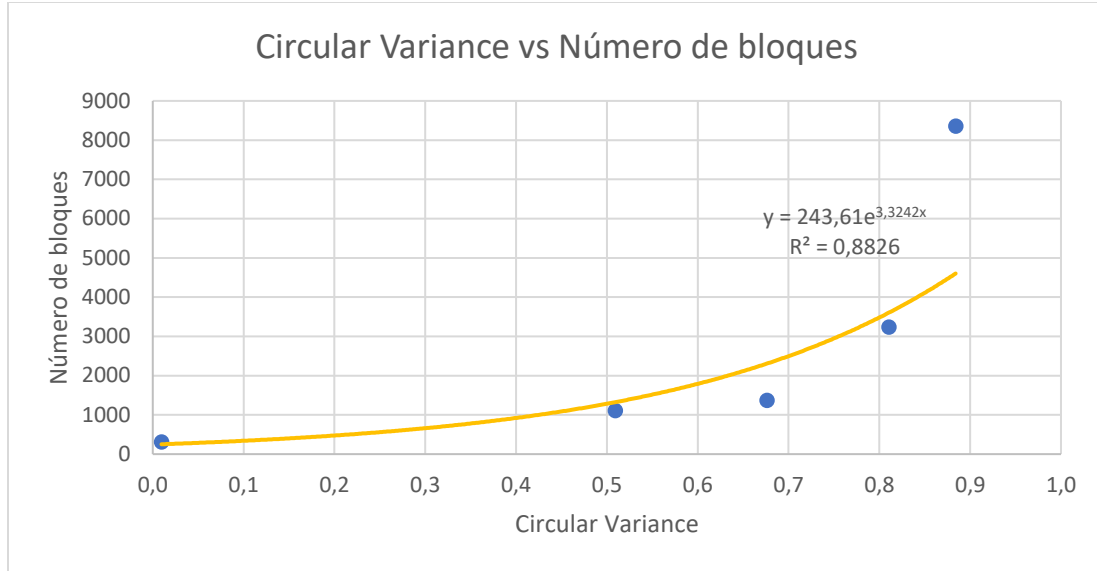


Ilustración 112 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.

Fuente 112 Elaboración propia.

Tabla 18 Número de cuñas, Número de bloques y Volumen medio vs Circular Variance, Fuente: Elaboración propia

P32 = 7 / P32 estimado = 7.1 (Hekmatnejad,2018)				
N° sets	N° cuñas	Volúmen medio m <sup>3</sup>	N° de bloques	Circular Variance
5	645	0.048239267	16584	0.817
4	704	0.031420604	25461	0.848
3	170	0.13570823	5895	0.679
2	78	0.14166814	5647	0.509
1	40	0.76555024	1045	0.008

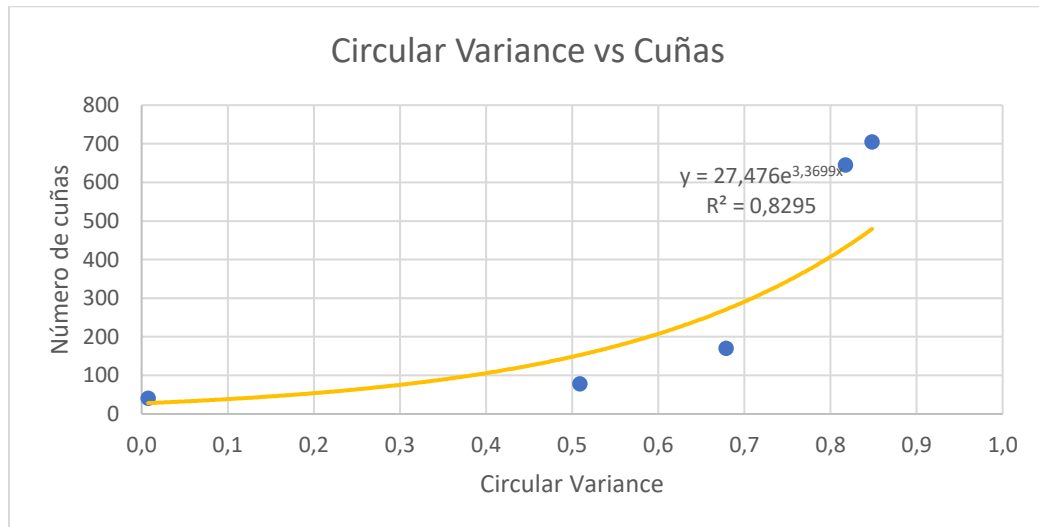
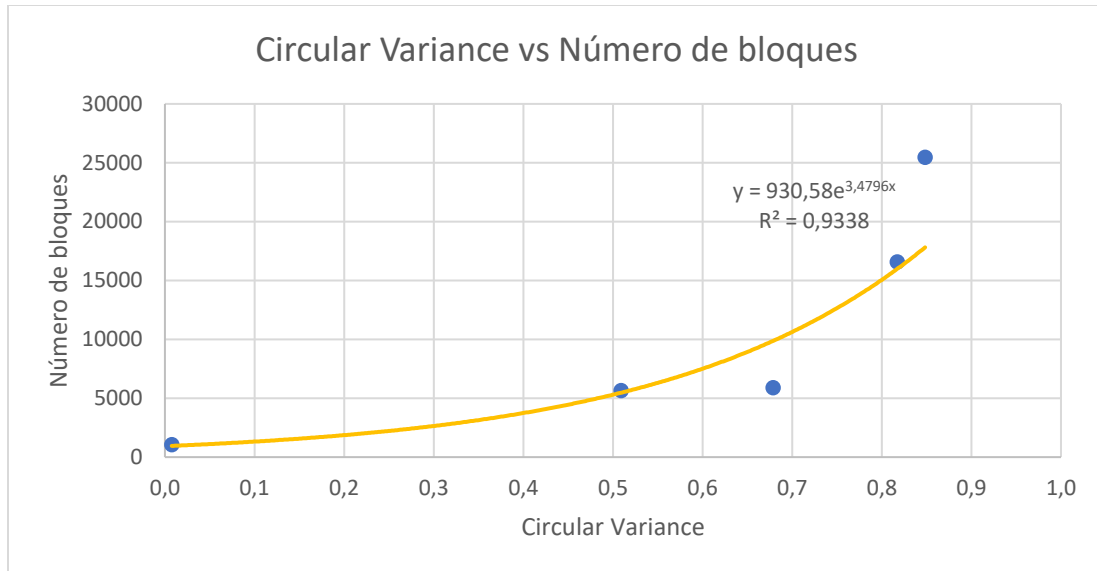


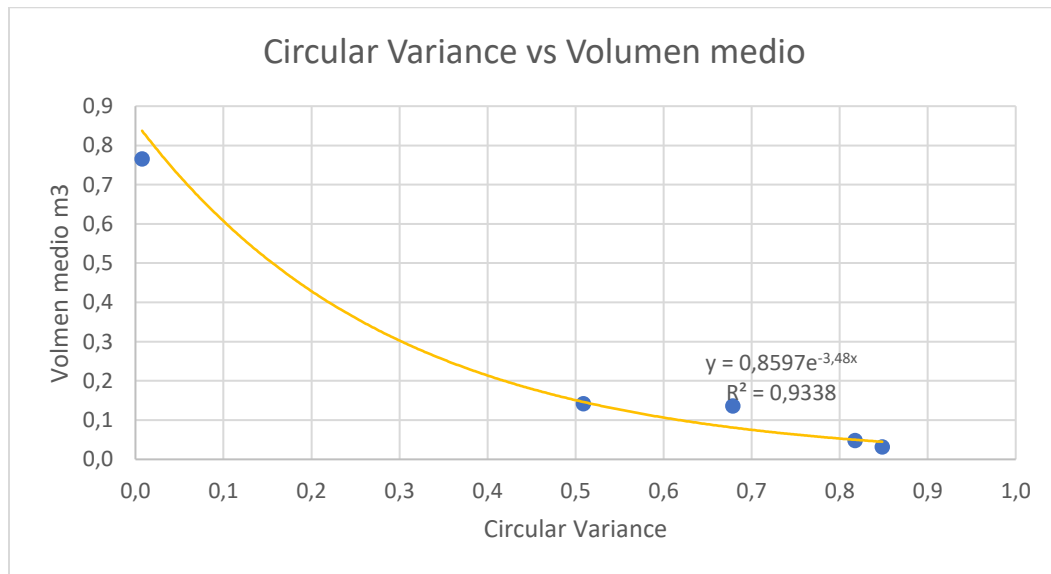
Ilustración 113 Circular Variance vs Número de cuñas.

Fuente 113 Elaboración propia.



*Ilustración 114 Circular Variance vs Número de bloques.*

*Fuente 114 Elaboración propia.*



*Ilustración 115 Circular Variance vs Volumen medio.*

*Fuente 115 Elaboración propia.*

## Anexo E

El siguiente apartado muestran los polos de todos los planos de discontinuidad para una región cuya P32 es 7, adicionalmente se señala las direcciones de las líneas de mapeo, al hacer esto resulta evidente que para poder seleccionar una línea de mapeo que intercepte mejor los planos de discontinuidad esta debe estar orientada en el polo de los sistemas de discontinuidad registrados, para este estudio se seleccionó en la dirección Z, simbolizada de color rojo y en el centro.

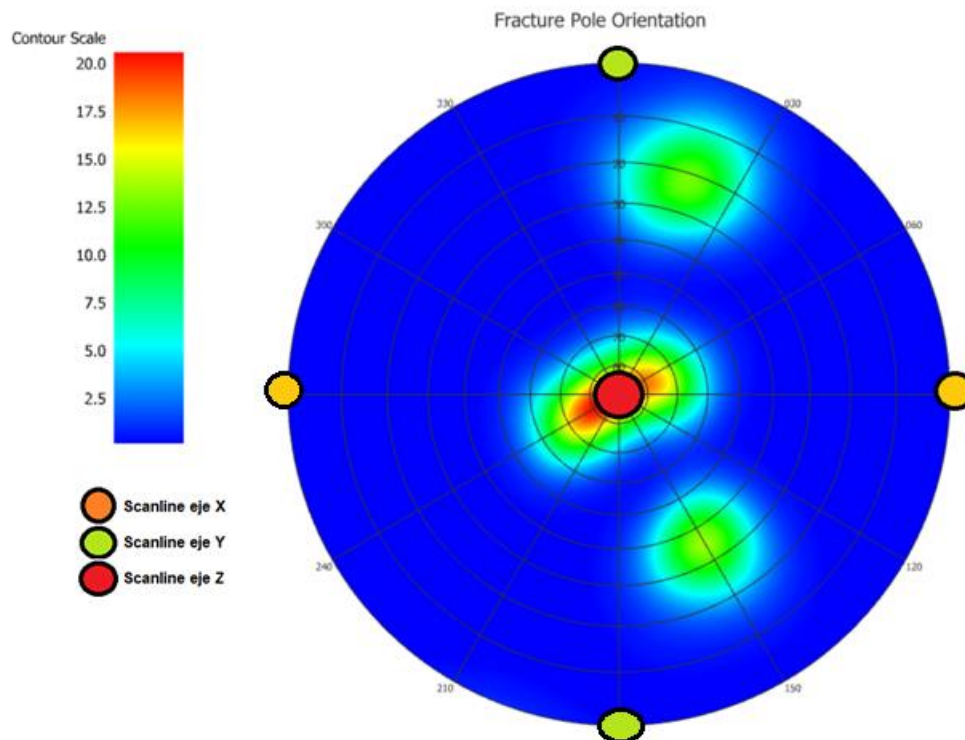


Ilustración 119 Red estereográfica, y representación de las scanlines utilizadas en el muestreo.

Fuente 119 Elaboración propia.



## Anexo F

A continuación, se muestra una comparación entre P32 simulado y el estimado por el método (Hekmatnejad, 2018).

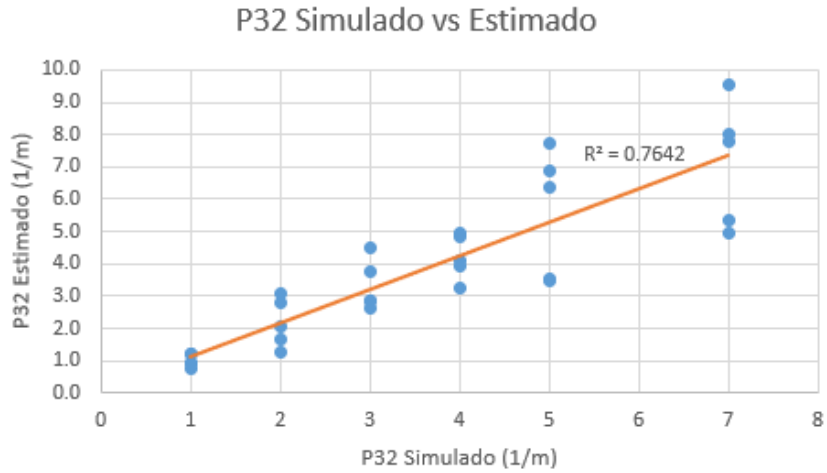


Ilustración 1160 Gráfico P32 simulado vs estimado.

Fuente 120 Elaboración propia.

La siguiente gráfico muestra una relación entre P32 simulado y el promedio de los estimados a través de sondajes.

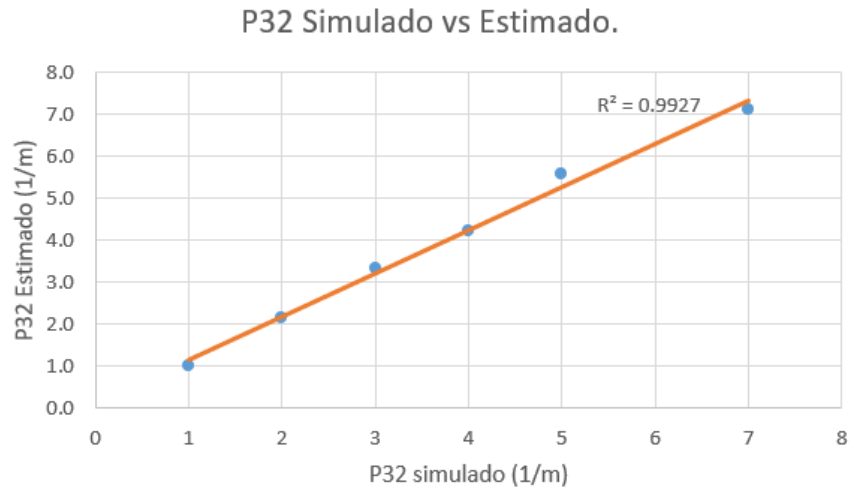


Ilustración 1171 Gráfico P32 simulado vs promedio P32 estimado.

Fuente 1161 Elaboración propia

## Anexo G

En esta sección se presentan gráficos generales para la estimación de variables geométricas dependientes de planos de discontinuidad en base a Circular Variance.

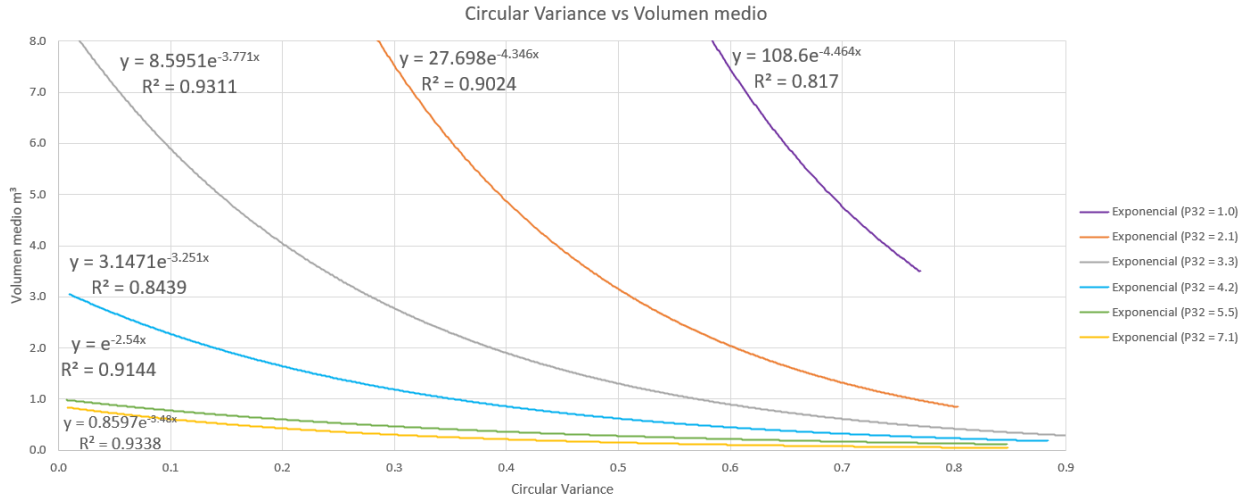


Ilustración 1182 Gráfico Circular Variance vs Volumen medio de bloques.

Fuente 1172 Elaboración propia.

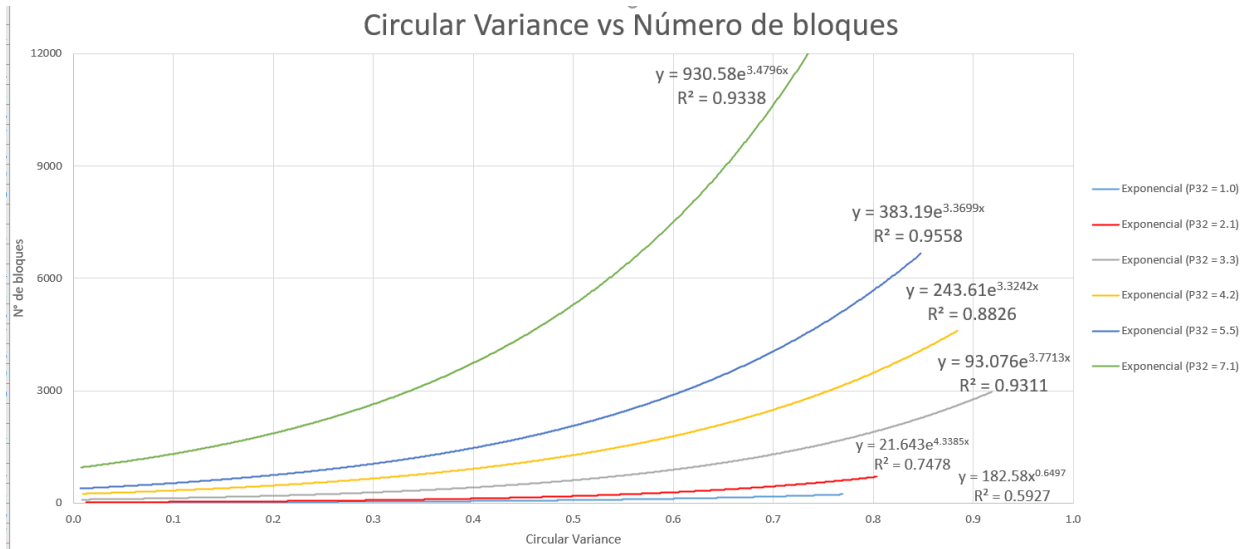
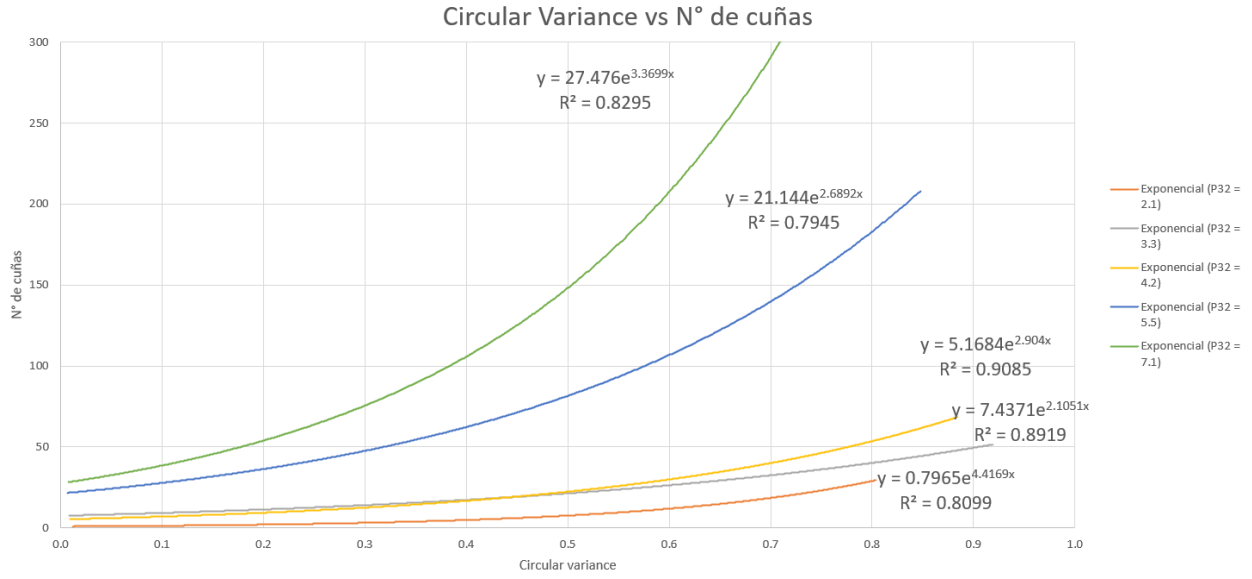


Ilustración 1193 Gráfico Circular Variance vs Número de bloques.

Fuente 1183 Elaboración propia.



*Ilustración 1204 Gráfico Circular Variance vs Número de cuñas.*

*Fuente 1194 Elaboración propia.*