

Tabla de contenido

Resumen	1
Abstract.....	2
Agradecimientos.....	4
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Motivación	14
1.2 Descripción del problema	15
1.3 Solución propuesta	16
1.4 Objetivos y alcances.....	17
1.4.1 Objetivo general	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	17
1.4.3 Alcances.....	17
1.6 Metodologías y herramientas utilizadas	18
1.7 Resultados esperados.....	18
1.8 Organización del documento.....	19
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Geotecnia y geomecánica	20
2.1.1 Discontinuidades.....	20
Tipos de discontinuidades.....	21
2.2 Sistemas de clasificación de macizo rocoso.....	22
2.2.1 Rock quality design.....	22
2.2.2 Rock mass rating	24
2.2.3 Índice Q de Barton	25
2.2.4 Spacing (Sf)	26
2.2.5 Frecuencia de fracturas (FF).....	27

2.2.6 Intensidad de fracturas.....	29
2.2.7 Redes de fracturas discretas (DFN)	30
2.3 Estimación de P32	32
2.3.1 Metodología de Dershowitz, 1991.....	32
2.3.2 Metodología de Zhang & Einstein, 2000	33
2.3.3 Metodología de Wang, 2006	35
2.3.4 Cálculo de P32 de forma directa.	37
2.4 Conceptos de geoestadística	38
2.4.1 Variable regionalizada.....	38
2.4.2 Soporte	38
2.4.3 Análisis exploratorio de datos	39
2.5 Modelamiento variográfico.....	39
2.5.1 Variograma experimental.....	40
2.5.2 Variograma modelado.....	42
2.5.3 Variograma cruzado	45
2.6 Estimación por Kriging.....	46
2.6.1 Kriging de media conocida (Kriging simple).....	48
2.6.2 Kriging de media desconocida (Kriging ordinario).....	49
2.6.3 Co-kriging.....	50
2.7 Simulación geoestadística.	51
2.7.1 Anamorfosis gaussiana.....	52
2.7.2 Simulación secuencial.....	53
2.7.3 Métodos de simulación condicional	54
2.7.4 Método de Bandas rotantes	55
2.8 Estado del arte: Geoestadística aplicada en geomecánica.....	58

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA: COSIMULACIÓN POR BANDAS ROTANTES....	61
3.1 Composición de FF y P32.....	61
3.2 Análisis exploratorio de los datos	64
3.3 Anamorfosis gaussiana	69
3.4 Modelamiento variográfico.....	71
3.5 Selección de parámetros de simulación	73
3.6 Validación cruzada.....	75
CAPITULO 4: RESULTADOS.....	77
4.1 Resultados de la primera realización.....	78
4.2 Resultados del promedio de cien realizaciones.....	80
4.3 Resultados del mínimo y máximo de cien realizaciones	82
4.3 Resultados del modelo de cokriging	84
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
5.1 CONCLUSIONES.....	86
5.2 RECOMENDACIONES	87
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA	88
CAPÍTULO 7: ANEXOS	94

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Tipos de falla, (Priest, 1993).	21
Ilustración 2: Distintos testigos para valores de RQD de 0 y 100%. (Palmstrom, 2012).	23
Ilustración 3: Direccionalidad del RQD, comparación con el índice, J_v de Palmstrom, (Palmstrom, 2012).	23
Ilustración 4: Direccionalidad de FF, en azul se observa un sondaje vertical con $FF=9$ [1/m], y en naranja un sondaje inclinado con $FF=2$ [1/m]. (Erazo, 2008).	28
Ilustración 5: Formación de bloques a partir de un modelo DFN. Elmo et al, 2014.	31
Ilustración 6: Clasificación de fracturas, según extremos observables, (Zhang & Einstein, 2000).	34
Ilustración 7 Triángulo formado por normal de fractura (n), polo medio de Fisher (m), y línea de mapeo (s), (Wang, 2006).	36
Ilustración 8: Tolerancia en la longitud del vector h y en la orientación, (Emery, 2007)	41
Ilustración 9: Alcance (range), y meseta (sill) en un variograma esférico, (Bardossy, 1997).	42
Ilustración 10: a) Variograma modelado caso con, y sin efecto pepita b) Variogramas experimentales, (Chilés & Delfiner, 2012).	43
Ilustración 11: a) Variable regionalizada con comportamiento esférico b) Variograma teórico esférico, (Emery, 2007).	44
Ilustración 12: a) Variable regionalizada con comportamiento exponencial b) variograma teórico exponencial, (Emery, 2007).	44
Ilustración 13: a) Variable con comportamiento gaussiano b) variograma teórico gaussiano, (Emery, 2007).	45
Ilustración 14: Vecindad móvil elíptica para 3 datos por cuadrante, (Emery, 2007).	47
Ilustración 15: Anamorfosis gaussiana, (Emery, 2007)	52
Ilustración 16: Efecto de la vecindad móvil en la simulación gaussiana secuencial, (Emery, 2007).	54

Ilustración 17: Imagen esquemática de las bandas rotantes (i) correspondientes a una región P. (MANTOGLOU & WILSON, 1982).	56
Ilustración 18: Ángulo δ entre línea de sondaje y normal a fractura. Elaboración propia.	62
Ilustración 19 a) Vista Norte-Este de compósitos, para FF. b) Vista Norte-Cota de compósitos, para FF. c) Vista Este-Cota de compósitos, para FF. Elaboración propia.	64
Ilustración 20:a) Vista Norte-Este de compósitos, para P32. b) Vista Norte-Cota de compósitos, para P32. c) Vista Este-Cota de compósitos, para P32. Elaboración propia.	65
Ilustración 21: a) Vista 3D de compósitos, para a) FF. b) P32. Elaboración propia.	65
Ilustración 22: a) Histograma de compósitos para FF b) Histograma de compósitos para P32. Elaboración propia.	67
Ilustración 23: a) Media condicional de compósitos por Cota, para FF. b) Media condicional de compósitos por cota para FF. Elaboración propia.....	67
Ilustración 24: Nube de dispersión entre FF y P32. Elaboración propia.....	68
Ilustración 25: Histograma de valores gaussianos para FF y P32. Elaboración propia.	69
Ilustración 26: a) Histograma ncores para FF, b) Histograma ncores para P32. Elaboración propia.....	69
Ilustración 27: Modelamiento de colas para histograma de ncores de a) FF, b) P32. Elaboración propia.....	70
Ilustración 28: Variogramas directos y cruzados para FF y P32 Elaboración propia.	72
Ilustración 29: Diagrama de exactitud para a) FF, b) P32. Elaboración propia.....	76
Ilustración 30: Diagrama de precisión para a) FF, b) P32. Elaboración propia.....	76
Ilustración 31: Histograma primera realización, para FF y P32. Elaboración propia.	78
Ilustración 32:: Vista cortes 3D de primera realización , para a) FF, b) P2. Elaboración propia.	79

Ilustración 33: Histograma del promedio de cien realizaciones, para FF y P32. Elaboración propia.....	80
Ilustración 34: Vista cortes 3D del promedio de 100 realizaciones, para a) FF, b) P2. Elaboración propia.....	81
Ilustración 35: Vista cortes 3D del mínimo de 100 realizaciones, para a) FF, b) P2. Elaboración propia.....	82
Ilustración 36: Vista cortes 3D del máximo de 100 realizaciones, para a) FF, b) P2. Elaboración propia.....	83
Ilustración 37: Histograma del cokriging, para FF y P32. Elaboración propia.....	84
Ilustración 38: Vista cortes 3D de cokriging para, a) FF, b) P32. Elaboración propia.	85
Ilustración 39: Código Matlab para compositación de FF y P32. Elaboración propia.	94
Ilustración 40: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para la primera realización de FF. Elaboración propia.....	95
Ilustración 41: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para la primera realización de FF. Elaboración propia.....	96
Ilustración 42: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para la primera realización de FF. Elaboración propia.....	97
Ilustración 43: Cortes Este-Cota de Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para la primera realización de FF. Elaboración propia.....	98
Ilustración 44: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para la primera realización de P32. Elaboración propia.....	99
Ilustración 45: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para la primera realización de P32. Elaboración propia.....	100
Ilustración 46: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para la primera realización de P32. Elaboración propia.....	101
Ilustración 47: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para la primera realización de P32. Elaboración propia.....	102
Ilustración 48: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el promedio de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	103

Ilustración 49: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para el promedio de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	104
Ilustración 50: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el promedio de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	105
Ilustración 51: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el promedio de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	106
Ilustración 52: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el promedio de 100 realizaciones de P32. Elaboración propia.....	107
Ilustración 53: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para el promedio de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.....	108
Ilustración 54: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el promedio de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.	109
Ilustración 55: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el promedio de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.	110
Ilustración 56: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el mínimo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	111
Ilustración 57: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para el mínimo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	112
Ilustración 58: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el mínimo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.	113
Ilustración 59: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el mínimo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.	114
Ilustración 60: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el mínimo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.....	115
Ilustración 61: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para el mínimo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.....	116
Ilustración 62: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el mínimo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.....	117
Ilustración 63: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el mínimo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.	118

Ilustración 64: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el máximo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	119
Ilustración 65: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para el máximo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.....	120
Ilustración 66: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el máximo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia	121
Ilustración 67: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el máximo de cien realizaciones de FF. Elaboración propia.	122
Ilustración 68: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el máximo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.....	123
Ilustración 69: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para el máximo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.....	124
Ilustración 70: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el máximo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.....	125
Ilustración 71: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el máximo de cien realizaciones de P32. Elaboración propia.	126
Ilustración 72: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el cokriging de FF. Elaboración propia.....	127
Ilustración 73: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m el cokriging de FF. Elaboración propia.....	128
Ilustración 74: Cortes Este-Cota para Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el cokriging FF de. Elaboración propia.....	129
Ilustración 75: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el cokriging de FF. Elaboración propia.....	130
Ilustración 76: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para la varianza de cokriging de FF. Elaboración propia.....	131
Ilustración 77: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para la varianza de cokriging de FF. Elaboración propia.....	132
Ilustración 78: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para la varianza de cokriging de FF. Elaboración propia.....	133

Ilustración 79: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para la varianza de cokriging de FF. Elaboración propia.....	134
Ilustración 80: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para el cokriging de P32. Elaboración propia.....	135
Ilustración 81: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para el cokriging de P32. Elaboración propia.....	136
Ilustración 82: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para el cokriging de P32. Elaboración propia.....	137
Ilustración 83: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para el cokriging de P32. Elaboración propia.....	138
Ilustración 84: Cortes Norte-Este en Cotas 3790m a 4290m para varianza de cokriging de P32. Elaboración propia.....	139
Ilustración 85: Cortes Norte-Este en Cotas 4390m a 4690m para la varianza de cokriging de P32. Elaboración propia.....	140
Ilustración 86: Cortes Este-Cota en Coordenadas Norte 7.679.350m a 7.682.550m para la varianza de cokriging de P32. Elaboración propia.....	141
Ilustración 87: Cortes Este-Cota en Coordenadas Este 529.300m a 532.500m para la varianza de cokriging de P32. Elaboración propia.....	142

Índice de tablas

Tabla 1: Medidas de intensidad de fracturas, (Palleske, 2014)	29
Tabla 2: Valor de $1/C_{13}$ para una distribución Fischer de parámetros k y p , (Wang, 2006).....	36
Tabla 3: Estadísticas básicas de los compósitos. Elaboración propia.....	66
Tabla 4: Parámetros utilizados en variograma experimental. Elaboración propia..	71
Tabla 5: Parámetros para creación de Grilla. Elaboración propia.....	74
Tabla 6: Estadísticas primera realización de co-simulación. Elaboración propia.....	78
Tabla 7: Estadísticas del promedio de cien realizaciones. Elaboración propia.....	80
Tabla 8: Estadísticas de cokriging para FF y P32. Elaboración propia.....	84