

Evaluación y caracterización del macizo rocoso para la identificación del comportamiento de los diferentes tipos de sostenimiento en la Mina El Roble, El Carmen de Atrato, Chocó, Colombia.

Oscar Oswaldo Villota Titistar



**Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales – Caldas
04 - Diciembre – 2022**

Evaluación y caracterización del macizo rocoso para la identificación del comportamiento de los diferentes tipos de sostenimiento en la Mina El Roble, El Carmen de Atrato, Chocó, Colombia.

Oscar Oswaldo Villota Titistar

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Geólogo.

Director académico

Geólogo

John Jairo Cardona Ríos

Director Institucional

Geólogo

José Alejandro Muñoz Maya

**Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales – Caldas
04 - Diciembre – 2022**

Nota de aceptación

APROBADO



John Jairo Cardona Ríos
Director académico

Dedicado

A la memoria de mi padre Florencio Villota.

A mi mamá Lidia Titistar, que ha dedicado su vida a enseñarme a ser una mejor persona.

A mis hermanos Belén, Jairo, Ricardo, Diana, Fabiana y Nena Sol, que han estado conmigo en los momentos difíciles, y me han dado la valentía para continuar, demostrándome su apoyo incondicional.

A mis sobrinas Nicolle, Sarita, María Paula y Danna Valentina, que muy pronto serán las profesionales de la familia.

Agradecimientos

A mi mamá y mis hermanos, porque con su esfuerzo me han dado la oportunidad de llegar hasta donde estoy.

A mis sobrinas, por sacarme una sonrisa cuando más lo he necesitado.

A mis amigos, quienes un día, sin esperar nada a cambio me ofrecieron su amistad, y fuimos avanzando a lo largo de esta etapa, apoyándonos y coleccionando momentos inolvidables, hoy puedo decir que hice una buena elección.

Al equipo de geomecánica de la mina El Roble, Ing. Angélica Martínez, Ing. José Alejandro Muñoz, Ing. Claus Gutiérrez, Ariel Rodríguez, Alexander García y Fabián Atará, quienes no solo me brindaron su confianza, si no también me compartieron su conocimiento y sus consejos, para crecer profesional y personalmente.

A mi director académico el profesor John Jairo Cardona, por estar siempre atento a mis dudas, por sus conocimientos, por su compromiso y sobre todo por su paciencia.

Contenido

Resumen	22
1. Introducción	24
2. Justificación.....	27
3. Objetivos	28
3.1. Objetivo general	28
3.2. Objetivos específicos.....	28
4. Metodología	29
4.1. Etapa I - Estado del arte de la Mina El Roble	29
4.2. Etapa II – Recopilación de datos.....	29
4.2.1. Trabajo de campo	29
4.2.2. Base de datos del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble	30
4.3. Etapa III – Validación y procesamiento de la información.....	31
4.4. Etapa IV – Informe final	31
5. Antecedentes	32
6. Marco teórico	36
6.1. Términos generales	36
6.1.1. Discontinuidad	36
6.1.2. Labores en minería subterránea.....	36
6.1.2.1. Labores mineras permanentes	37
6.1.2.2. Labores mineras temporales.....	37

6.1.3.	Macizo rocoso	38
6.1.4.	Mapeo geomecánico.....	38
6.1.5.	Depósito de sulfuros masivos volcanogénicos - VMS.....	38
6.2.	Geomecánica	40
6.2.1.	Caracterización geomecánica.....	40
6.2.1.1.	Resistencia a la compresión simple o uniaxial.....	40
6.2.1.2.	Índice de calidad de roca – RQD	41
6.2.1.3.	Espaciamiento de discontinuidades.....	42
6.2.1.4.	Condición de las discontinuidades	42
6.2.1.4.1.	Orientación.....	43
6.2.1.4.2.	Persistencia.....	43
6.2.1.4.3.	Rugosidad.....	43
6.2.1.4.4.	Apertura.....	43
6.2.1.4.5.	Relleno	43
6.2.1.4.6.	Alteración y Meteorización.....	44
6.2.1.5.	Otros factores a considerar	45
6.2.2.	Clasificación geomecánica.....	45
6.2.2.1.	Sistema RMR - Rock Mass Rating	46
6.2.2.2.	Sistema GSI - <i>Geological Strength Index</i>	47
6.3.	Sostenimiento	48
6.3.1.	Elementos de sostenimiento en minería subterránea.....	48
6.3.1.1.	Concreto lanzado o <i>Shotcrete</i> (SH).....	48
6.3.1.2.	Perno helicoidal (PH).....	49

6.3.1.3.	Perno <i>Split set</i> (SS)	50
6.3.1.4.	Malla electrosoldada (M)	51
6.3.1.5.	Enfilajes.....	52
6.3.1.6.	<i>Shotfer</i>	52
6.3.1.7.	Cimbras metálicas	52
6.3.2.	Estándar de sostenimiento mina El Roble.....	53
6.4.	Método de minado.....	54
6.4.1.	Ciclo de minado	57
7.	Marco geológico.....	60
7.1.	Geología Regional.....	60
7.1.1.	Formación Barroso.....	61
7.1.2.	Formación Penderisco	62
7.1.2.1.	Miembro Nutibara	62
7.1.2.1.	Miembro Urrao.....	63
7.1.3.	Geología Estructural.....	65
7.1.3.1.	Falla La Mansa	65
7.1.3.2.	Falla San Lorenzo.....	65
7.1.3.3.	Falla San Francisco	65
7.2.	Geología Local	65
7.2.1.	Basaltos (Kv).....	66
7.2.2.	Chert Negro (Kbc).....	67
7.2.3.	Chert Gris (Kgc).....	68
7.2.4.	Secuencia sedimentaria (Kss).....	68

7.2.5.	Sulfuro Masivo (Ms).....	68
7.2.6.	Diques andesíticos (Tad).....	69
7.3.	Geología estructural local.....	70
7.3.1.	Fallas	71
7.3.2.	Diaclasas.....	71
7.3.3.	Pliegues	73
7.3.4.	Zonas de cizalla.....	73
7.3.5.	Modelo estructural.....	74
7.4.	Tipo de depósito	78
7.5.	Geología económica.....	79
8.	Resultados	80
8.1.	Análisis geomecánico del macizo rocoso.....	80
8.1.1.	Mapeo geomecánico.....	80
8.1.2.	Clasificación RMR de Bieniawski (1989)	82
8.1.2.1.	Litología	83
8.1.2.2.	Resistencia a la compresión simple o uniaxial.....	84
8.1.2.3.	Índice de calidad de roca – RQD	85
8.1.2.4.	Espaciamiento de las discontinuidades	87
8.1.2.5.	Condición de las discontinuidades	88
8.1.2.5.1.	Persistencia.....	89
8.1.2.5.2.	Abertura.....	89
8.1.2.5.3.	Rugosidad.....	90
8.1.2.5.4.	Relleno	91

8.1.2.5.5. Alteración.....	92
8.1.2.6. Agua subterránea.....	93
8.1.2.7. Índice RMR básico.....	94
8.1.2.8. Índice RMR corregido.....	95
8.1.2.8.1. Zona 1.....	100
8.1.2.8.2. Zona 2.....	106
8.1.2.8.3. Zona 3.....	112
8.1.3. Clasificación GSI de Hoek y Marinos (2000).....	118
8.1.4. Zonificación geomecánica.....	120
8.2. Recomendaciones de sostenimiento.....	121
9. Análisis de los resultados	126
9.1. Modelo estructural del cuerpo Zeus	126
9.2. Clasificación geomecánica del macizo rocoso del nivel 1692.....	128
9.3. Zonificación geomecánica.....	131
9.4. Formación y estabilidad de cuñas	132
9.5. Recomendaciones de sostenimiento.....	133
10. Discusión.....	136
11. Conclusiones	139
12. Recomendaciones.....	141
13. Referencias	143
14. Anexos.....	150

Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación Proyecto El Roble.....	26
Figura 2: Metodología aplicada para el desarrollo del presente documento.....	31
Figura 3: Modelo general para la formación de depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos modificado de Galley, (1993) y Franklin, (1995) por Franklin et al. (2005).....	39
Figura 4: Proceso utilizado para evaluar el valor del RQD en un testigo de perforación. Tomado de ACG, 2003 en Osinergmin, 2017.....	42
Figura 5: Espaciamiento y condición de las discontinuidades.....	44
Figura 6: Ejemplo parámetros de clasificación y puntaje RMR de Bieniawski, 1989 (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).....	46
Figura 7: Carta de clasificación GSI para macizos rocosos a partir de las observaciones geológicas (Hoek y Marinos, 2000).....	47
Figura 8: <i>Shotcrete</i> : a) Instalación de <i>shotcrete</i> con equipo mecánico <i>Robojet</i> . b) Labor sostenida por completo utilizando <i>shotcrete</i> , malla electrosoldada y perno <i>split set</i>	49
Figura 9: Perno helicoidal: a) Partes de un perno helicoidal (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004). b) Perno helicoidal instalado en hastial con <i>shotcrete</i> y malla electrosoldada.....	50
Figura 10: Perno <i>Split set</i> : a) Partes de un perno <i>Split set</i> (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004). b) Perno <i>split set</i> instalado en hastial con <i>shotcrete</i> y malla electrosoldada.....	51
Figura 11: Labor en proceso de instalación de <i>Shotfer</i> con equipo manual <i>Jackleg</i>	53
Figura 12: Cimbras metálicas: a) Tipos de cimbras rígidas. b) Cimbras deslizantes (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).....	53

Figura 13: Patrón de explotación de niveles del cuerpo Zeus, mina El Roble (Kelly, 2021).	55
Figura 14: Accesos al nivel de explotación: a) Ventana de acceso. b) Galería de acceso (Departamento de Planeamiento, mina El Roble, 2017).....	56
Figura 15: Secuencia de minado de paneles primarios (color azul) y paneles secundarios (color rojo) (Departamento de Planeamiento, mina El Roble, 2017).....	56
Figura 16: Distribución de paneles en los niveles del cuerpo Zeus: a) Paneles primarios con su respectiva división en tajos (color azul), nótese la alineación de los paneles secundarios formando un pilar de mineral. b) Paneles primarios (color azul) y paneles secundarios (color rojo) (Departamento de Planeamiento, mina El Roble, 2017).	57
Figura 17: Ciclo de minado mina El Roble (Ver explicación en el texto).....	59
Figura 18: a) Evolución tectónica del noroeste de Colombia (Tomado y modificado de Bedoya et al., 2009).	61
Figura 19: Mapa geológico regional Proyecto el Roble. (Tomado y modificado de Calle et al., 1984).	64
Figura 20: a) Sección transversal esquemática del cuerpo de Zeus, depósito El Roble (Kelly, 2021). b) Columna estratigráfica, depósito El Roble (Pratt, 2014).....	66
Figura 21: Basalto (Kv) con tonalidad verdosa, con rellenos de calcita.	67
Figura 22: Chert negro (Kbc): a) Bloque de chert negro con rellenos de calcita y arrastres de sulfuro. b) Afloramiento de chert negro, nótese que se puede reconocer la estratificación y el desarrollo de pliegues en el mismo.	67
Figura 23: Mineralización del cuerpo de Zeus, depósito El Roble: a) Sulfuro semimasivo con rellenos de calcita. b) Sulfuro masivo con típica tonalidad dorada. c) Contacto fallado entre el chert negro (Kbc) y el sulfuro masivo (ms). d) Intrusión de dique andesítico	

(Tad) en sulfuro masivo (ms) con arrastres de chert negro, e) Andesita de textura afanítica, nótese el color rojizo por la presencia de jaspe.	69
Figura 24: Mineralización del cuerpo de Zeus, depósito El Roble: a) Intrusión de dique andesítico (Tad) en sulfuro masivo (ms), b) Andesita de textura porfirítica, nótese los fenocristales de anfíbol.....	70
Figura 25: Fallas de carácter normal e inverso cortando dique andesítico (Tad) en sulfuro masivo (ms).	71
Figura 26: Diaclasamiento del cuerpo de Zeus, depósito El Roble: a) Disposición de 4 familias de diaclasas. b) Bloques de sulfuro, nótese las caras en los bloques que yacen en el piso como en los que están colgando.....	72
Figura 27: Pliegue tipo Chevron desarrollado en sulfuro.	73
Figura 28: Zonas de cizallamiento: a) Zona de contacto entre dique y chert negro donde se observa grietas de extensión escalonadas que sugieren eventos sobreimpuestos (Falla normal y falla inversa. b) Blasto de dique evidenciando un fallamiento normal.....	74
Figura 29. Diagrama de roseta (software DIPS). Nótese una tendencia 87°/180° y otra tendencia 43°/85°.	75
Figura 30. Ejemplo correlación de fallas principales en el nivel 1692 (NV_1692) utilizando el software AutoCAD.	76
Figura 31. Vista en planta y perfil del modelo estructural del cuerpo Zeus (Escala 1:1750): a) Discontinuidades que siguen una tendencia 43 ° /85 °. b) Discontinuidades que siguen una tendencia 87° /180°.	77
Figura 32: Modelo idealizado del depósito de sulfuros masivos volcanogénicos, Proyecto El Roble (Tomado y modificado de Espinal, 2020).	78

Figura 33. Partes de una labor subterránea: 1) Hastiales; 2) Bóvedas; 3) Corona o techo; y 4) Gradiente.....	81
Figura 34. Ejemplo de mapeo geomecánico utilizando el <i>software AutoCAD (Sin Escala)</i> . Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble.....	82
Figura 35. Estaciones geomecánicas nivel 1692 (Escala 1:400).....	83
Figura 36. Orientación de las discontinuidades principales respecto al sentido de la labor subterránea: a) Avance perpendicular al sistema de discontinuidades; b) Buzamiento de la discontinuidad a favor del avance; c) Buzamiento de la discontinuidad en contra del avance. (Tomado y adaptado de Osinergmin, 2017; LOM, 2015).	96
Figura 37. Orientación de las discontinuidades principales respecto al sentido de la labor subterránea: Avance paralelo al sistema de discontinuidades (Tomado y adaptado de Osinergmin, 2017).	96
Figura 38. Orientación de las discontinuidades principales respecto al sentido de la labor subterránea: Avance perpendicular a la cuña (Tomado y adaptado de Osinergmin, 2017).	97
Figura 39. Condición de las discontinuidades con su respectiva puntuación o <i>rating</i> para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.....	98
Figura 40. Infraestructura NV 1692 con zonas para ajuste por orientación de discontinuidades para el cálculo de RMR corregido.	99
Figura 41. Análisis estadístico en el software Dips para la zona 1 –NV_1692: a) Diagrama de roseta. b) Diagrama de contornos, donde se marcan las áreas con mayor densidad de	

concentración de polos indicando las 3 familias de discontinuidades. c) Estereograma mostrando los planos principales de las 3 familias de discontinuidades.	101
Figura 42. Representación estereográfica de las labores subterráneas respecto a las discontinuidades principales: zona 1.....	102
Figura 43. Análisis de cuñas en tajos que avanzan hacia el E (azimut= 70°) de la zona 1: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.	104
Figura 44. Análisis de cuñas en tajos y ventana sur que avanzan hacia el W (azimut= 250°) de la zona 1: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.	105
Figura 45. Análisis de cuñas en galería (azimut= 152°) de la zona 1: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de la galería.	105
Figura 46. Análisis estadístico en el software Dips para la zona 2 –NV_1692: a) Diagrama de roseta, indicando las 3 tendencias principales de las discontinuidades. b) Diagrama de contornos, donde se marcan las áreas con mayor densidad de concentración de polos indicando las 3 familias de discontinuidades. c) Estereograma mostrando los planos principales de las 3 familias de discontinuidades.	107
Figura 47. Representación estereográfica de las labores subterráneas respecto a las discontinuidades principales: zona 2.....	108
Figura 48. Análisis de cuñas en tajos que avanzan hacia el E (azimut= 70°). de la zona 2: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.	110

Figura 49. Análisis de cuñas en tajos que avanzan hacia el W (azimut= 250°) de la zona 2: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos..... 111

Figura 50. Análisis de cuñas en galería (azimut= 152°) de la zona 2: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos..... 111

Figura 51. Análisis estadístico en el software Dips para la zona 3 – NV_1692: a) Diagrama de roseta. b) Diagrama de contornos, donde se marcan las áreas con mayor densidad de concentración de polos indicando las 3 familias de discontinuidades. c) Estereograma mostrando los planos principales de las 3 familias de discontinuidades. 113

Figura 52. Representación estereográfica de las labores subterráneas respecto a las discontinuidades principales: zona 3..... 114

Figura 53. Análisis de cuñas en tajos de la zona 3: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos (azimut= 332°)..... 116

Figura 54. Análisis de cuñas en ventana norte de la zona 3: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de la ventana (azimut= 250°)..... 116

Figura 55. Colores utilizados para zonificación geomecánica nivel 1692 (Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017). 121

Figura 56. Ejemplo de aplicación de la metodología para obtener el tipo de sostenimiento para un tajo, de acuerdo al estándar de sostenimiento de la mina El Roble (Tomado y modificado de Departamento de geomecánica de la mina El Roble)..... 123

Figura 57. Análisis estadístico en el software Dips para el cuerpo Zeus: a) Diagrama de roseta, indicando las 2 tendencias principales de las discontinuidades. b) Diagrama de contornos, donde se indican las 4 familias de discontinuidades principales. c) Representación estereográfica de las familias de discontinuidades. 127

Figura 58. Representación porcentual de: a) Resistencia a la compresión simple; b) alteración; c) RQD; d) Espaciamiento. 130

Figura 59. Representación porcentual del macizo rocoso del nivel 1692: a) Clasificación RMR; b) Clasificación GSI, nótese el uso de colores de acuerdo a la zonificación geomecánica (Ver anexo I). 132

Figura 60. Abaco de tiempo de auto sostenimiento de Bieniawski (1989) para labores subterráneas. La línea naranja indica la altura promedio de una labor, la línea roja indica un macizo con un RMR de 30, línea verde un macizo con RMR de 51, y las líneas azules el tiempo promedio de auto sostenimiento (Tomado y modificado de Osinergmin, 2017). 135

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de excavaciones mineras subterráneas. Tomado y adaptado de Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - Osinergmin, 2017.	37
Tabla 2. Tipos de depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos. Tomado y adaptado de Franklin et al. (2005).	40
Tabla 3. Clasificación de la roca con base a la resistencia a la compresión. Tomado y adaptado de la <i>International Society for Rock Mechanics</i> (ISRM, 2014).....	41
Tabla 4: Recursos minerales Proyecto El Roble, reportados a septiembre 30 de 2020. Adaptado de Kelly, (2021).	79
Tabla 5. Caracterizaciones geomecánicas de cada litología realizadas en 49 estaciones geomecánicas.	82
Tabla 6. Resistencia a la compresión simple con su respectiva puntuación o <i>rating</i> para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.	84
Tabla 7. Resistencia a la compresión simple de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble. Nótese la variabilidad de las resistencias en una misma litología.	85
Tabla 8. Relación entre RQD y frecuencia de fracturas por metro lineal. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.	86
Tabla 9. Rangos de RQD con su respectiva puntuación o <i>rating</i> para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.	86
Tabla 10. RQD de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.	86
Tabla 11. Rangos de espaciamiento con su respectiva puntuación o <i>rating</i> para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.	87
Tabla 13. Condición de las discontinuidades con su respectiva puntuación o <i>rating</i> para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.	89

Tabla 14. Persistencia utilizada para el cálculo de RMR en las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.....	89
Tabla 15. Rangos de abertura de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.....	90
Tabla 16. Rangos de rugosidad predominantes de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.....	91
Tabla 17. Rellenos predominantes presentes en las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.	92
Tabla 18. Alteración predominante en las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.	92
Tabla 19. Rangos de presencia de agua subterránea con su respectiva puntuación o <i>rating</i> para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.....	93
Tabla 20. Clasificación del agua subterránea utilizada para el cálculo de RMR.	93
Tabla 21. Interpretación de los valores de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.....	94
Tabla 22. Orientación de las labores subterráneas del nivel 1692.	99
Tabla 23. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el E de la zona 1.	103
Tabla 24. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el W y ventana sur de la zona 1.	103
Tabla 25. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para la galería de la zona 1.....	103
Tabla 26. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el W de la zona 2.	109

Tabla 27. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el E de la zona 2.	109
Tabla 28. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para la galería de la zona 2.	109
Tabla 29. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para la ventana norte de la zona 3. .	114
Tabla 30. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para los tajos de la zona 3.	115
Tabla 31. Clasificaciones obtenidas para cada zona del nivel 1692.	118
Tabla 32. Grado de fracturamiento. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.	119
Tabla 33. Condición de las discontinuidades. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.	119
Tabla 34. Clasificación GSI para las litologías presentes en el nivel 1692 de la mina El Roble.	120
Tabla 35. Recomendaciones de sostenimiento para avances de labores temporales en el nivel 1692.	124
Tabla 36. Recomendaciones de sostenimiento para avances de labores permanentes en el nivel 1692.	125
Tabla 37. Familias de discontinuidades principales y secundarias presentes en el cuerpo Zeus.	126
Tabla 38. Condición de las cuñas respecto a las labores subterráneas en el nivel 1692.	133
Tabla 39. Resumen sostenimiento para labores subterráneas temporales en el nivel 1692.	134
Tabla 40. Resumen sostenimiento para labores subterráneas permanentes en el nivel 1692.	134

Índice de Anexos

Anexo I.....	151
Zonificación geomecánica nivel 1692.....	151
Anexo II.....	152
Infraestructura nivel 1692.....	152
Anexo III.....	153
Formato de mapeo geomecánico y parámetros de clasificación geomecánica	153
Anexo IV.....	158
Estándar de sostenimiento y clasificación GSI para labores mineras temporales.....	158
Estándar de sostenimiento y clasificación GSI para labores mineras permanentes	159
Anexo V	163
Caracterización y clasificación geomecánica nivel 1692: zona 1	163
Caracterización y clasificación geomecánica nivel 1692: zona 2	166
Caracterización y clasificación geomecánica nivel 1692: zona 3	167
Anexo VI.....	168
Datos estructurales nivel 1692: Zona 1	168
Datos estructurales nivel 1692: Zona 2	172
Datos estructurales nivel 1692: Zona 3	174

Resumen

El mayor riesgo que enfrentan las operaciones de minería subterránea, es la caída de roca desde el inicio hasta el cierre de la mina; conscientes de ello, se han desarrollado diferentes métodos para estabilizar una labor subterránea, los cuales se fundamentan en la cuantificación de la calidad del macizo rocoso a partir de sus propiedades geomecánicas. En el presente trabajo se realiza un análisis geomecánico del macizo rocoso del nivel 1692 del cuerpo “Zeus” de la mina El Roble, siguiendo los criterios del sistema RMR corregido de Bieniawski (1989) y el sistema GSI de Hoek y Marinos (2000), además, se incluye un análisis estructural, para definir las tendencias principales de las discontinuidades y la posible formación de cuñas de roca, para recomendar un sostenimiento acorde al tipo de labor subterráneas, basado en el estándar de sostenimiento de la mina. Adicionalmente, se correlaciona las discontinuidades principales en rumbo y profundidad, para proponer un modelo estructural del cuerpo Zeus y compáralo con el existente en el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble.

El modelo estructural planteado, coincide con el existente e integra nueva información, permite visualizar condiciones estructurales, es confiable y tiene una amplia aplicación tanto en el área operativa como investigativa. El análisis geomecánico permitió construir un mapa de zonificación geomecánica del nivel 1692, en el que se identifican cuatro macizos rocosos de diferente calidad; siendo la calidad predominante de regular a moderada (RMR entre 31 y 50; GSI: IF-MF/R-P). Sin embargo, existen zonas donde la calidad disminuye considerablemente o aumenta levemente, donde se infiere que este comportamiento está directamente relacionado con la orientación de las discontinuidades principales, la presencia de agua y la alteración. El análisis estructural sugiere que las fallas geológicas tienen dos tendencias principales: NNW-SSE y NWW-SEE, que pueden estar representadas hasta por tres familias de discontinuidades, que a grandes rasgos son potenciales

formadores de cuñas de roca. El sostenimiento recomendado se ajustó a estas condiciones, y contribuyo a estabilizar los frentes de trabajo, garantizando la seguridad del personal y equipos durante toda la explotación.

1. Introducción

La minería es una de las actividades económicas más importantes a nivel mundial; en Colombia para el año 2021 el sector minero representó el 1.91% del PIB total; no obstante, para el mismo año las actividades de explotación minera presentaron la tasa de mortalidad más alta con 67.82 muertes por cada 100.000 trabajadores (Consejo Colombiano de Seguridad – CCS, 2022). En contraste, según cifras de la Agencia Nacional de Minería (ANM) durante lo transcurrido del 2011 hasta el 31 de mayo de 2022, se han presentado 1262 accidentes y 1373 fallecidos, de los cuales la causa más frecuente se relaciona a accidentes por fallas geomecánicas con 401 decesos en 448 accidentes (Ministerio de Minas y Energía, 2022). Los antecedentes no son muy alentadores; sin embargo, las compañías mineras han buscado implementar diferentes estrategias para disminuir estas tasas de accidentalidad. Como parte de esa tendencia, la mina El Roble, principal proyecto de la empresa canadiense *Atico Mining Corporation*, operada por Minera El Roble S.A. (MINER S.A.), es quizá la mina con mayor compromiso en el tema, pues ha logrado que la operación sea segura para el personal y equipos.

La mina El Roble se localiza en el municipio de El Carmen de Atrato, departamento del Chocó, Colombia, el acceso al proyecto se realiza desde la ciudad de Medellín (Antioquia), a través de la vía principal que conduce hasta Quibdó (Chocó), desviándose en el punto conocido como “El Siete” hasta la cabecera municipal de El Carmen de Atrato; desde allí, finalmente se avanza 3 km al norte por una vía sin pavimentar que conduce hasta el municipio de Urrao (Antioquia). Aproximadamente se recorren 145 km en un viaje que puede tardar 4 horas en vehículos de doble tracción. La topografía es bastante abrupta, varía entre los 1600 – 2700 msnm, con una vegetación de montaña boscosa y valles cultivados, las temperaturas oscilan entre los 18° – 28° C, el clima es tropical húmedo, el río Atrato siendo el principal drenaje de la zona, fluye de norte a sur,

presentando alto caudal y gran energía de transporte debido a las altas precipitaciones que fácilmente alcanzan los 2942 mm al año (Atico Mining Corporation, 2021) (Figura 1).

El presente trabajo, se orienta a proponer un modelo estructural del cuerpo actualmente explotado “Zeus”, e incluir la caracterización geomecánica del macizo rocoso de los frentes de explotación activos y explotados, a fin de realizar la corrección de Bieniawski según la disposición de las discontinuidades y recomendar el tipo de sostenimiento a instalarse.

De este modo, se presentan 14 capítulos así: en el primer capítulo se realiza un preámbulo que describe el contenido del documento e incluye la ubicación geográfica de la mina El Roble; el segundo capítulo presenta la justificación del estudio realizado; el tercer capítulo enseña los objetivos propuestos para la elaboración de este trabajo; en el cuarto capítulo se contempla la metodología utilizada durante el desarrollo de este proyecto; en el quinto capítulo se presenta una revisión de los principales estudios realizados en la mina El Roble, relacionados con los objetivos planteados; en el sexto capítulo el lector encontrará una descripción de diferentes aspectos importantes, los cuales le permitirán tener un contexto apropiado de lo mencionado en este informe; en el séptimo capítulo se muestra a escala regional y local: la estratigrafía, geología estructural incluyendo el modelo estructural y geología económica; en el octavo capítulo se presenta el análisis geomecánico del macizo rocoso, esto incluye caracterización del macizo rocoso y recomendación del sostenimiento; en el capítulo noveno se examina los resultados obtenidos; en el décimo capítulo se realiza una discusión resaltando y cuestionando algunos resultados; en el undécimo capítulo se presenta las conclusiones; el duodécimo capítulo contiene algunas recomendaciones; en el decimotercer capítulo se presentan las referencias que bien le sirven al lector para ampliar el conocimiento acerca de algún tema en mención; y por último en el decimocuarto capítulo se anexan datos interesantes que se involucran en capítulos anteriores.

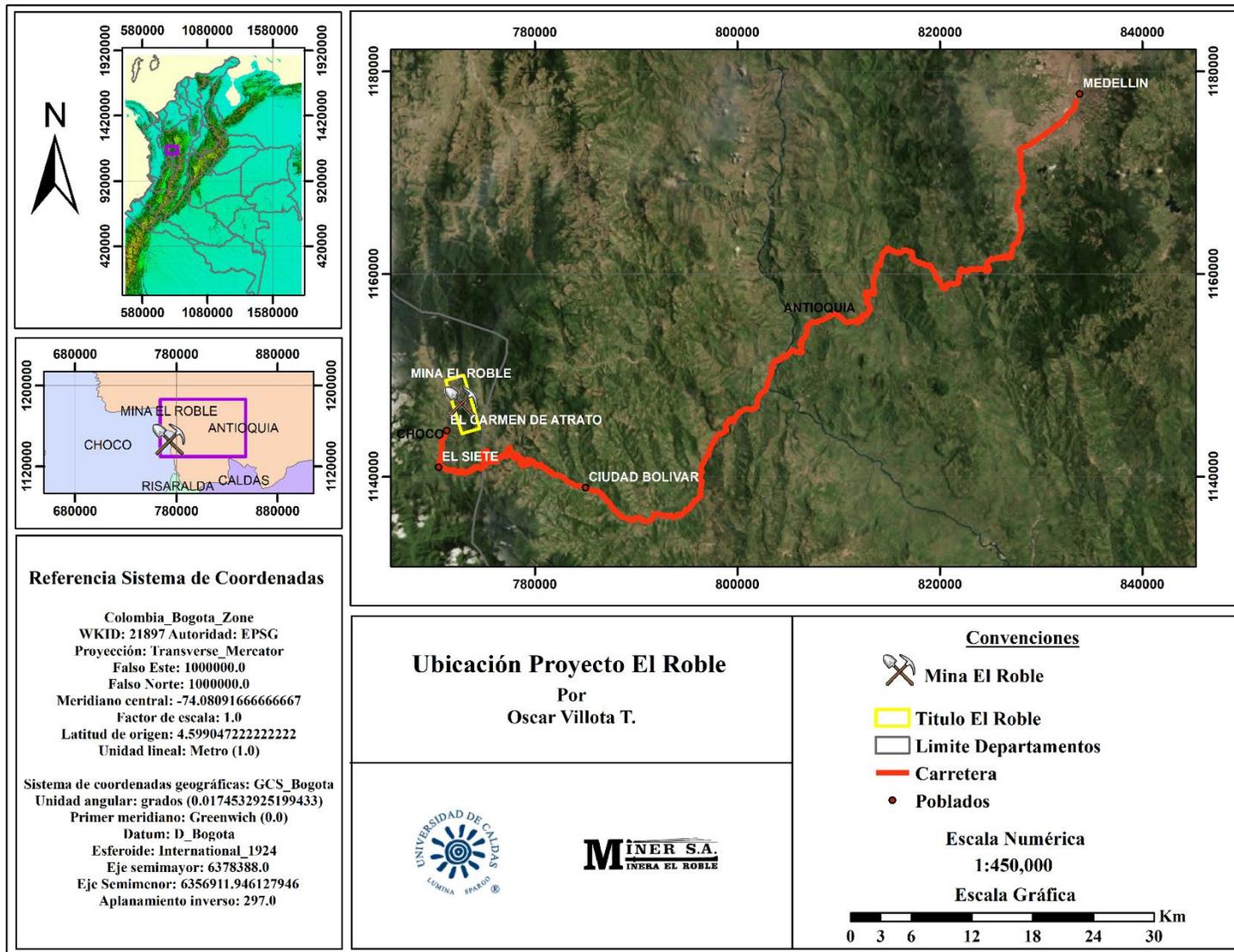


Figura 1: Ubicación Proyecto El Roble.

2. Justificación

La minería subterránea se considera una de las actividades de mayor riesgo que las personas y/o equipos realizan en términos de seguridad; día a día, se conocen accidentes e incidentes, de los cuales la mayoría son producto de la inestabilidad del macizo rocoso (caída de roca), ocasionando pérdidas económicas y en el peor escenario pérdidas humanas.

Bajo este panorama, el geólogo aporta en las operaciones, conocimiento científico y empírico, en el mapeo y caracterización geomecánica del macizo rocoso, con el fin de reconocer las fallas geológicas principales y determinar tanto la disposición de estas como la calidad de la roca en el cuerpo mineralizado “Zeus”. De esta manera, se identifica y correlaciona en rumbo y profundidad estas estructuras geológicas, buscando proponer un modelo geológico estructural, que apoyado en las clasificaciones geomecánicas más comunes como son la de Bieniawski o RMR, y el Índice de Resistencia Geológica (GSI), permitan tanto evaluar el comportamiento de los diferentes tipos de sostenimiento instalados, como especificar el tipo de sostenimiento adecuado para estabilizar un frente explotado o en explotación, y aplicarlo a futuros proyectos para evitar y/o disminuir la caída de roca, y garantizar así una operación segura.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de los diferentes tipos de sostenimiento utilizados en los socavones a partir de la caracterización del macizo rocoso en todos los niveles explotados, así como los niveles y frentes de explotación activos de la Mina El Roble, realizando el análisis de algunos elementos de la geología estructural y la geomecánica. Esto con el fin de aplicar los resultados a futuros proyectos de explotación.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar a partir de la caracterización de discontinuidades como fallas, fracturas y diaclasas el *Rock Mass Rating* (RMR).
- Calcular desde el Rock Mass Rating el *Geological Strength Index* (GSI).
- Realizar la corrección de Bieniawski según la disposición de las discontinuidades principales respecto a la dirección de la labor para obtener un "Modelo corregido de la zonificación geomecánica con base en RMR".
- Recomendar el tipo de sostenimiento de acuerdo a los parámetros RMR y GSI.
- Correlacionar las fallas geológicas en profundidad y en rumbo en los diferentes niveles desarrollados y en desarrollo de la mina.
- Proponer un nuevo modelo estructural y compararlo con el existente.

4. Metodología

Sabino (1992) señala que: “la investigación descriptiva utiliza criterios sistemáticos que permiten evaluar el comportamiento de los fenómenos en estudio, proporcionando de ese modo información sistemática y comparable con la de otras fuentes”

Así, la metodología aplicada para el desarrollo de los objetivos planteados en este trabajo se considera de tipo descriptiva, debido a que se analiza, registra y describe las actividades ejecutadas. De este modo, se presentan las siguientes etapas (Figura 2):

4.1. Etapa I - Estado del arte de la Mina El Roble

Se revisó la bibliografía existente como revistas científicas, artículos científicos, publicaciones especiales, tesis de pregrado y maestría, informes técnicos, libros y guías, para contemplar los avances en conocimiento geológico y geomecánico de la mina El Roble, relacionados al tipo de estudio realizado.

4.2. Etapa II – Recopilación de datos

La información se obtuvo de dos fuentes principales: 1) observación directa en campo de las condiciones geomecánicas del macizo rocoso; 2) base de datos del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble.

4.2.1. Trabajo de campo

Se empleó el trabajo de campo como técnica para el levantamiento de información base, esta permitió evaluar y caracterizar el macizo rocoso en un frente en explotación, y con este recomendar el tipo de sostenimiento que debe instalarse. Este procedimiento se realizó a diario posterior a una voladura e involucró las siguientes actividades:

1. Mapeo geomecánico: se registró en una sección hecha a mano, las principales familias de discontinuidades expuestas en el macizo rocoso en el techo de las labores,

especificando su distribución espacial, orientación, tipo de discontinuidad y tipo de roca (sulfuro, chert, dique, etc.).

2. Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso: con base en el sistema RMR (Valoración de la Masa Rocosa o *Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989) se determinó la calidad del macizo rocoso. Esta clasificación requirió evaluar y registrar la resistencia a la compresión uniaxial, el RQD (*Rock Quality Designation*), el espaciamiento de las discontinuidades, la condición de las discontinuidades (persistencia, rugosidad, apertura, relleno y alteración) y la presencia de agua subterránea.
3. Recomendación del sostenimiento: una vez se obtenía el puntaje del RMR, este se llevó al sistema GSI (Índice de Resistencia Geológica) de Hoek y Marinos (2000), con el fin de recomendar el sostenimiento que más se adapte a la calidad del macizo, apoyado en el estándar de sostenimiento de la mina El Roble.
4. Registro de la información en formato digital y archivos físicos: con la información recolectada en campo se actualizó los mapas geomecánicos digitales de cada nivel utilizando el software *AutoCAD*; además, se agregaron a la base de datos estructurales los datos de orientación de las discontinuidades en formato azimutal y *Dip/Dip Direction*, y finalmente se archivaron los formatos utilizados para la caracterización del macizo rocoso.

4.2.2. Base de datos del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble

Con el fin de complementar la información para el desarrollo de este trabajo, se dispuso de datos estructurales, planos y caracterizaciones geomecánicas recolectadas por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble en los últimos años.

4.3. Etapa III – Validación y procesamiento de la información

Se revisó toda la información con el propósito de que los datos sean confiables, y así proceder a realizar una interpretación de los mismos, considerando bases teóricas e implementando *software* tales como *AutoCAD*, *Rocscience*, *DATAMINE* y *Microsoft Office*.

4.4. Etapa IV – Informe final

Finalmente se elaboró el presente informe incluyendo el modelo estructural del cuerpo Zeus del proyecto El Roble.

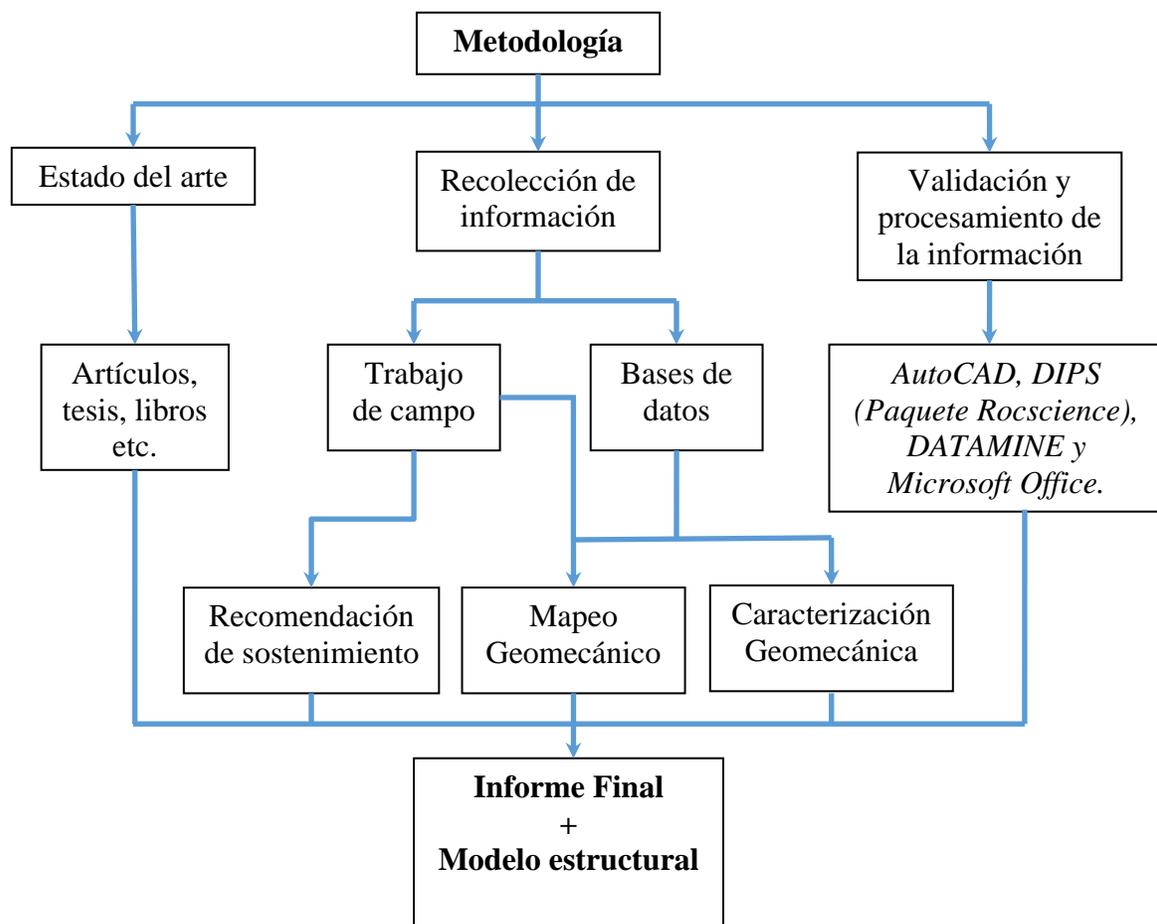


Figura 2: Metodología aplicada para el desarrollo del presente documento.

5. Antecedentes

Con el fin de diagnosticar el estado actual en que se encuentra el conocimiento geológico y geomecánico de la mina El Roble, se realizó una revisión de los principales documentos, como una primera noción para la elaboración del presente informe, de los cuales se trae a colación lo más relevante:

Ortiz (1990) publicó un artículo titulado “*El Roble, un yacimiento de sulfuros masivos volcanogénico*” donde evalúa las características geológicas del yacimiento El Roble, con el objetivo de determinar su origen y como una guía para futuros programas de exploración. Así, determina que el depósito es de tipo Chipre; y hace referencia a que los metales sulfurosos fueron precipitados de soluciones hidrotermales a través de aberturas en el fondo oceánico en zonas con actividad volcánica, con presencia de sedimentos pelágicos y se concentraron principalmente en la interfase chert-basalto.

Martínez-Quiceno (2019) con la tesina “*EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA CONSTRUCCIÓN DE RUTA DE EVACUACIÓN EN MINA EL ROBLE CON TECNOLOGÍA ALIMAK*” determinó la propuesta más viable para la construcción de una ruta de evacuación en términos de seguridad, costos del sostenimiento y tiempo de ejecución. Presenta:

- La caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso en diferentes niveles de la mina El Roble, empleando el sistema de clasificación de Bieniawski (1989), arrojó que el avance se realizara sobre dos unidades principales conocidas como chert gris (Kgc) y chert negro (Kbc); así, estimó que en condiciones estándar el chert gris tendría un RMR entre 31 a 40, y en casos donde las condiciones geomecánicas sean más desfavorables el RMR podría rondar de 25 a 30. Por otro lado, el chert negro (de menor calidad que el Kgc) tendría un RMR entre 31 a 35.

- El análisis estructural permitió identificar 5 familias de discontinuidades (tres principales y dos secundarias), las cuales presume que pueden formar cuñas en las paredes y techo de la excavación. Por lo que evalúa el factor de seguridad apoyándose en el *software Rocscience*, encontrando la formación de cuñas de gran tamaño, pero recalca que las mismas son estructuralmente estables.

Gutiérrez-Hernández (2019) en la tesis de pregrado presentada para optar por el título de Geólogo “Caracterización geomecánica y recomendación de elementos de sostenimiento necesarios para la estabilidad de las labores temporales y permanentes del macizo rocoso en el nivel 1727 de la mina El Roble” destaca lo siguiente:

- En el nivel 1727, se identifican cuatro unidades litológicas principales: basalto (Kv), sulfuro (Ms), chert negro (Kbc) y diques (Tad); siendo las tres primeras las predominantes, las cuales posterior a la caracterización geomecánica según el sistema de clasificación de Bieniawski (1989) determinó para el sulfuro un RMR igual a 48, para el basalto un RMR de 54 y para el chert negro un RMR de 36.
- Del mismo modo, estas litologías según el sistema de GSI reciben la siguiente clasificación: basalto de estructura muy fracturado en buena condición (MF/B), chert negro de estructura intensamente fracturado y condición pobre (IF/P) y sulfuro muy fracturado de condición regular (MF/R).
- El análisis estructural indica que las discontinuidades principales presentan hacia el norte del nivel 1727 una tendencia bien definida con sentido NW-SE y en menor proporción en sentido NE-SW que va disminuyendo conforme se avanza hacia el sur del mismo nivel.

Murillo Bedoya (2020) en la tesis de pregrado presentada para optar por el título de Geólogo “*PETROGRAPIC AND LITHO-GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE VMS DEPOSIT AT EL ROBLE MINE, COLOMBIAN WESTERN CORDILLERA*” concluye:

- Según la caracterización geoquímica de los elementos mayores, traza y REE, los basaltos de la Formación Barroso se relacionan con al menos dos fuentes de manto diferentes (E-MORB y N-MORB).
- En el depósito El Roble se reconocen 2 eventos de alteraciones hidrotermales: el primero durante la formación de basaltos relacionados con el rift-pull-apart(?) y la mineralización inducida debido a la percolación de agua oceánica en las rocas; la segunda alteración producto de la acreción de estas unidades al continente en un entorno relacionado con la subducción.

Espinal-Corrales (2020) en la tesis de maestría presentada para optar por el título de Magister en Ingeniería – Recursos Minerales *“CARACTERIZACIÓN Y MODELO ESTRUCTURAL DEL YACIMIENTO DE SULFUROS MASIVOS VOLCANOGÉNICOS DE LA MINA EL ROBLE”* presenta un análisis estructural donde sugiere:

- El yacimiento de VMS de la mina El Roble está sometido a un sistema transpresivo dextral influenciado principalmente por la falla regional La Mansa.
- En las zonas de contacto entre chert negro y sulfuros masivos se desarrollan zonas de cizalla con presencia de fallas anastomosadas; además, evidencia que los estos contactos litológicos tienen orientación preferencial NE-SW.
- Toda la secuencia del depósito de la mina El Roble se encuentra invertida, dentro de un sistema de pliegues isoclinales en dirección NE-SW con buzamiento hacia el este.

Gómez-Rodríguez (2022) en el informe de practica académica presentado para optar por el título de Geólogo *“Caracterización, Zonificación Geomecánica y Recomendación del Sostenimiento Necesario Para la Estabilidad de Labores Temporales y Permanentes del Macizo Rocoso en el Nivel 1712 del Cuerpo Zeus de la Mina El Roble”* expone:

- En el nivel 1712 se identifican cinco familias de discontinuidades (FM), las cuales presentan la siguiente disposición: FM1) orientación predominante al NEE-SWW y buzamientos de muy alto ángulo; FM2) tendencia W-E y buzamientos entre los 40° y los 60°; FM3) orientación predominantemente N-S y buzamientos casi verticales; FM4) rumbo NNW-SSE y buzamientos menores a 45°; FM5) rumbo NE-SW con un alto ángulo de buzamiento.
- De acuerdo a la caracterización geomecánica según el sistema de clasificación de Bieniawski (1989) Las unidades litológicas presentes en el nivel 1712 presentan la siguiente calificación: basalto (Kv) tipo 1 con RMR igual a 39.4 y tipo 2 con RMR igual a 47.4; sulfuro (Ms) tipo 1 con RMR igual a 36.5, tipo 2 con RMR igual a 45.5 y tipo 3 con un RMR de 52.3, chert negro (Kbc) tipo 1 con RMR igual a 42.4 y tipo 2 con RMR igual a 37.3 y diques (Tad) tipo 1 con RMR igual a 41.2 y tipo 2 con RMR igual a 52.2.
- La clasificación según el sistema GSI es: basalto tipo 1 intensamente fracturado regular (IF/R) y tipo 2 moderadamente fracturado regular (MF/R); sulfuro (Ms) tipo 1 intensamente fracturado regular (IF/R), tipo 2 moderadamente fracturado regular (MF/R) y tipo 3 moderadamente fracturado regular (MF/R); chert negro tipo 1 moderadamente fracturado regular (MF/R) y tipo 2 intensamente fracturado regular (IF/R) y diques (Tad) tipo 1 intensamente fracturado regular (IF/R) y tipo 2 moderadamente fracturado regular (MF/R).

6. Marco teórico

En minería subterránea la heterogeneidad del entorno geológico ofrece un alto grado de incertidumbre, por ende, durante el desarrollo de un proyecto como el de la mina El Roble, día a día surgen percances que en su mayoría son relacionados a la estabilidad de las labores, lo cual conlleva a buscar alternativas que disminuyan la probabilidad de ocurrencia de una situación desfavorable. Esto se logra ampliando el conocimiento geológico y geomecánico a través de métodos analíticos, numéricos y empíricos, que se basan en información que se recoge a detalle. Así, para tener un contexto apropiado de lo mencionado en este informe, es necesario hacer una revisión breve de diferentes aspectos importantes.

6.1. Términos generales

6.1.1. Discontinuidad

Una discontinuidad corresponde a cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa en bloques un macizo rocoso, modificando su comportamiento mecánico global, las discontinuidades pueden ser observadas desde una escala regional hasta una escala de microfracturas (González de Vallejo *et al.*, 2002). Existen diferentes tipos de discontinuidades como lo son fallas geológicas, diaclasas, planos de estratificación, planos de foliación, zonas de contacto litológico y fracturas. Por consiguiente, llevar un registro de la ubicación, orientación, espaciado y condición de estas discontinuidades durante una explotación minera, permitirá realizar una interpretación de posibles mecanismos de falla del macizo rocoso, dando la posibilidad de desarrollar un diseño de sostenimiento óptimo.

6.1.2. Labores en minería subterránea

Una labor subterránea corresponde a cualquier excavación que se realice bajo tierra con el fin de explorar, cuantificar y explotar minerales (Ministerio de Minas y Energía, 2015). De este modo,

en la minería subterránea existen diferentes excavaciones que permiten el acceso y tránsito hasta a un frente de explotación de personal, equipos y servicios. En función de la vida útil de la labor, se han dividido en dos categorías: labores mineras permanentes y labores mineras temporales (Tabla 1).

6.1.2.1. Labores mineras permanentes

Las labores mineras permanentes hacen referencia a las excavaciones donde el personal y equipos transitan con regularidad durante gran parte de la vida de la mina. Por ende, requiere que su diseño, construcción y sostenimiento cumpla con especificaciones técnicas especiales que garanticen que el macizo rocoso sea estable a largo plazo (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - Osinergmin, 2017).

6.1.2.2. Labores mineras temporales

Las labores mineras temporales corresponden a las excavaciones que permiten la explotación de un bloque mineral, y el tránsito de personal y equipos será en periodos de tiempo cortos (semanas, o hasta meses). Esto permite que el diseño, construcción y sostenimiento sean menos rigurosos, sin embargo, se debe asegurar que el macizo rocoso sea estable de corto a mediano plazo (Osinergmin, 2017).

Tabla 1. Tipos de excavaciones mineras subterráneas. Tomado y adaptado de Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - Osinergmin, 2017.

Labores mineras permanentes	Rampas principales, bypass, chimeneas principales de servicios, inclinados, desarrollos del nivel principal, rutas de escape, cargaderos, áreas de oficinas y comedor, cámaras de refugio, salas de reuniones y/o monitoreo, bodegas mineras, polvorines subterráneos, subestaciones eléctricas, estaciones de primeros auxilios, excavaciones de chancado, estaciones de bombeo principal, áreas de talleres, estacionamiento vehicular, etc.
Labores mineras temporales	Tajos de explotación, galerías, crucero de acceso a tajeo local, crucero de extracción, cruceros de servicios (agua, aire, relleno, etc.), chimeneas o slots de producción, chimeneas de ventilación de tajos, chimeneas de servicios de tajos, etc.

6.1.3. Macizo rocoso

Se entiende como macizo rocoso a la forma en que se presentan las rocas en el medio natural, involucrando así, planos de estratificación, fallas, pliegues entre otras características estructurales. Por ende, un macizo rocoso es discontinuo, heterogéneo y/o anisótropo (Ramírez y Alejano, 2004).

6.1.4. Mapeo geomecánico

El mapeo geomecánico consiste en registrar a detalle las discontinuidades expuestas en el macizo rocoso en las labores subterráneas. Para ello, se registra en un plano o sección cada discontinuidad empezando con su distribución espacial dentro del avance o labor, continuando con el registro de la orientación (buzamiento y dirección de buzamiento), tipo de discontinuidad, persistencia, apertura, relleno, rugosidad, meteorización y presencia de agua. Esta información será indispensable al momento de clasificar el macizo rocoso mediante los diferentes sistemas de clasificación como el sistema RMR (*Rock Mass Rating*), sistema GSI (Índice de Resistencia Geológica) o el sistema Q de Barton (Osinergmin, 2017).

6.1.5. Depósito de sulfuros masivos volcanogénicos - VMS

Los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (*Volcanogenic massive sulfide deposits - VMS*) son acumulaciones de minerales de sulfuro formados en el fondo marino cerca a sitios de descarga de fluidos hidrotermales, son predominantemente estratiformes y su depositación es singenética con secuencias volcano-sedimentarias producto del vulcanismo coetáneo; los minerales de sulfuro presentes en este tipo de depósitos son en mayor parte pirita, además, de cantidades variables de calcopirita, pirrotita, esfalerita, y galena, por consiguiente son importantes fuentes de elementos como cobre, zinc, plomo, oro y plata (Franklin *et al.*, 2005).

Franklin *et al.* (2005) clasifican litoestratigráficamente los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos en cinco tipos, esto a partir de límites de secuencias sedimentarias bien definidas como fallas, intrusiones e importantes rupturas cronológicas estratigráficas (Tabla 2). Además, proponen un modelo general (Figura 3) resaltando los siguientes elementos que propician la formación de estos depósitos en un sistema hidrotermal de alta temperatura: 1) Una fuente de calor que contribuya al sistema hidrotermal y aporte algunos metales; 2) Una zona de reacción, donde interactúan los fluidos hidrotermales y el agua de mar, permitiendo la lixiviación de algunos metales de rocas volcánicas y sedimentarias; 3) Fallas o fracturas que permitan el ascenso focalizado de los fluidos hidrotermales; 4) Zonas de alteración, producto de la interacción de la roca con el fluido hidrotermal ascendente; 5) El depósito de sulfuro masivo formado en el fondo del mar; y 6) Productos distales, que contribuyan a la sedimentación de fondo.

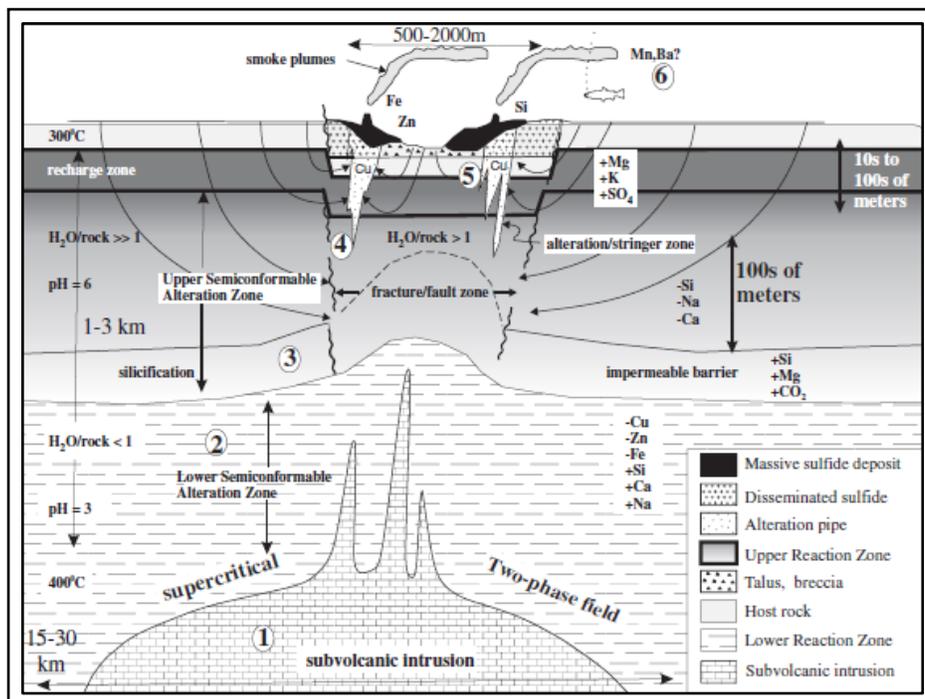


Figura 3: Modelo general para la formación de depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos modificado de Galley, (1993) y Franklin, (1995) por Franklin *et al.* (2005).

Tabla 2. Tipos de depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos. Tomado y adaptado de Franklin et al. (2005).

Tipo	Entorno tectónico y unidades litológicas típicas
Bimodales	Arcos oceánicos de supra-subducción con fisuras incipientes, con flujos y estratos félsicos <25%.
Máficos	<i>Backarcs</i> oceánicos primitivos. Presentan secuencias de ofiolitas con sedimentos <10%.
Máfico-pelítico	<i>Backarcs</i> oceánicos maduros. Presentan cantidades inferiores de pelitas y basaltos.
Félsico bimodal	Arcos epicontinentales de supra-subducción con fisuras incipientes. Presentan de 35 a 70% de estratos volcanoclásticos félsicos.
Félsicos-siliciclásticos	<i>Backarcs</i> epicontinentales maduros. Presentan estratos sedimentarios y volcanoclásticos derivados de continentes.

6.2. Geomecánica

La geomecánica es una ciencia aplicada derivada de la mecánica de rocas y suelos, que estudia la deformación y posterior falla de suelos y rocas, resultado principalmente de la variación de esfuerzos, la presión, temperatura y en menor medida parámetros ambientales. Además, se caracteriza por considerar métodos cuantitativos y cualitativos como herramienta para diseño, ejecución y estabilización de labores subterráneas (Cook, 2016).

6.2.1. Caracterización geomecánica

En minería subterránea la caracterización geomecánica es uno de los procesos más importantes, ya que es el punto de partida para determinar la calidad del macizo y con el determinar en primera instancia el método de minado y las dimensiones de las labores, esto permite a su vez, seleccionar el tipo de sostenimiento adecuado, con el fin de garantizar óptimas condiciones de seguridad para personal y equipos. Bajo esta premisa, las características a considerar son las siguientes:

6.2.1.1. Resistencia a la compresión simple o uniaxial

Es una medida de resistencia que corresponde al esfuerzo máximo que puede soportar una roca antes de fracturarse (Feijoo y Padrón, 2020). Se puede determinar a partir de ensayos de laboratorio como el ensayo de carga puntual o mediciones más subjetivas en campo utilizando el esclerómetro

o martillo Schmidt y con base a golpes de martillo geológico que realice el colaborador en este caso el geólogo (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de la roca con base a la resistencia a la compresión. Tomado y adaptado de la *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 2014).

Clase	Calificación de la roca según su resistencia	Resistencia a la compresión (MPa)	Estimación en campo de la resistencia
R6	Extremadamente resistente	>250	La roca solamente se astilla con varios golpes con el martillo geológico
R5	Muy Resistente	100 - 250	La roca requiere varios golpes con el martillo geológico para romperse
R4	Resistente	50 - 100	La roca rompe con de 1 a 3 golpes con el martillo geológico
R3	Moderadamente resistente	25 - 50	La roca rompe con un golpe firme con el martillo geológico
R2	Débil	5 - 25	La roca indenta superficialmente con la punta del martillo geológico
R1	Muy Débil	1 - 5	La roca indenta profundamente con la punta del martillo geológico
R0	Extremadamente débil	0.25 - 1	La roca puede ser indentada con la uña

6.2.1.2. Índice de calidad de roca – RQD

El índice de calidad de roca o RQD por sus siglas en inglés (*Rock Quality Designation*), definido por Deere (1964), fue desarrollado inicialmente para taladros de perforación diamantina, es una técnica estándar utilizada para definir la competencia de un macizo rocoso, asignando un porcentaje de 0% a 100% para una roca menos y más competente respectivamente. De este modo, el valor del RQD se expresa en porcentaje a partir de la relación de la sumatoria de todas las partes con longitudes mayores a 10 cm dividido entre la longitud total de la corrida de perforación (Figura 4).

Sin embargo, se han desarrollado métodos alternativos para calcular el RQD en campo, basándose en el mismo teorema, pero aplicado a la frecuencia de las discontinuidades (Osinergmin, 2017).

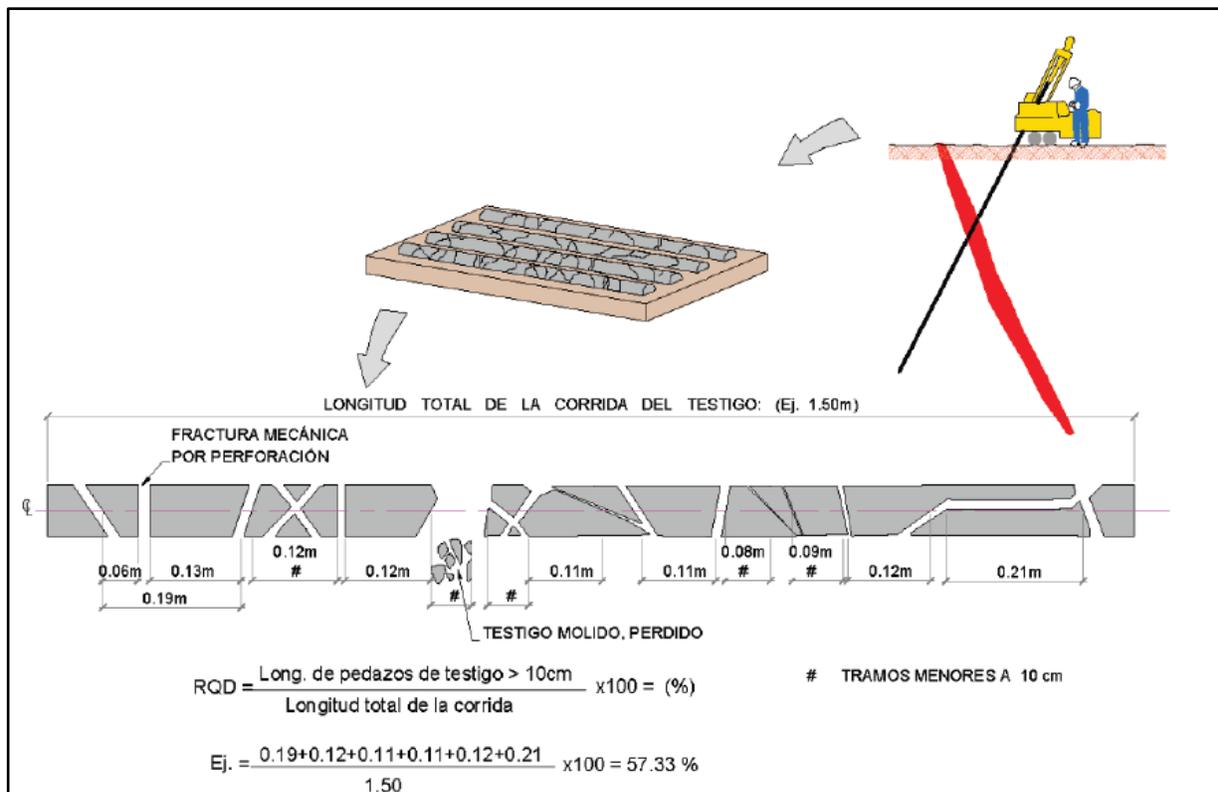


Figura 4: Proceso utilizado para evaluar el valor del RQD en un testigo de perforación. Tomado de ACG, 2003 en Osinergmin, 2017.

6.2.1.3. Espaciamiento de discontinuidades

El espaciamiento hace referencia a la distancia perpendicular entre discontinuidades de una misma familia (Figura 5), determina el tamaño de los bloques de roca y es inversamente proporcional al fracturamiento, ya que a menor espaciado mayor será el fracturamiento y viceversa (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.2.1.4. Condición de las discontinuidades

Las condiciones de las discontinuidades influyen en el comportamiento del macizo rocoso, por ende, es indispensable evaluar sus propiedades (Figura 5):

6.2.1.4.1. Orientación

Es la disposición espacial de la discontinuidad, definida por su rumbo y buzamiento; cuando un conjunto de discontinuidades presenta una orientación similar, se le atribuye el nombre de sistema o familia de discontinuidades (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.2.1.4.2. Persistencia

Es la longitud o extensión superficial del plano de la discontinuidad (Rodríguez, 2007), la cual puede variar desde algunos centímetros hasta varios kilómetros en estructuras de carácter regional. Se relaciona con la estabilidad del macizo rocoso, ya que, a mayor persistencia de las discontinuidades, el macizo será menos estable y viceversa (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.2.1.4.3. Rugosidad

Hace referencia a la irregularidad, aspereza y/o ondulación en que se presenta la superficie de la discontinuidad; así, un macizo rocoso será más estable conforme la rugosidad sea mayor (Rodríguez, 2007).

6.2.1.4.4. Apertura

Corresponde a la separación o distancia perpendicular que existe entre las paredes rocosas de una discontinuidad (Rodríguez, 2007); donde a menor apertura el macizo tendrá condiciones de estabilidad más favorables y viceversa (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.2.1.4.5. Relleno

Corresponde al material que aparece dentro de una discontinuidad (Rodríguez, 2007). Se relaciona con la competencia del macizo rocoso, ya que, cuando los rellenos son blandos el macizo tiene una competencia baja, en cambio cuando estos rellenos son duros el macizo es más competente (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

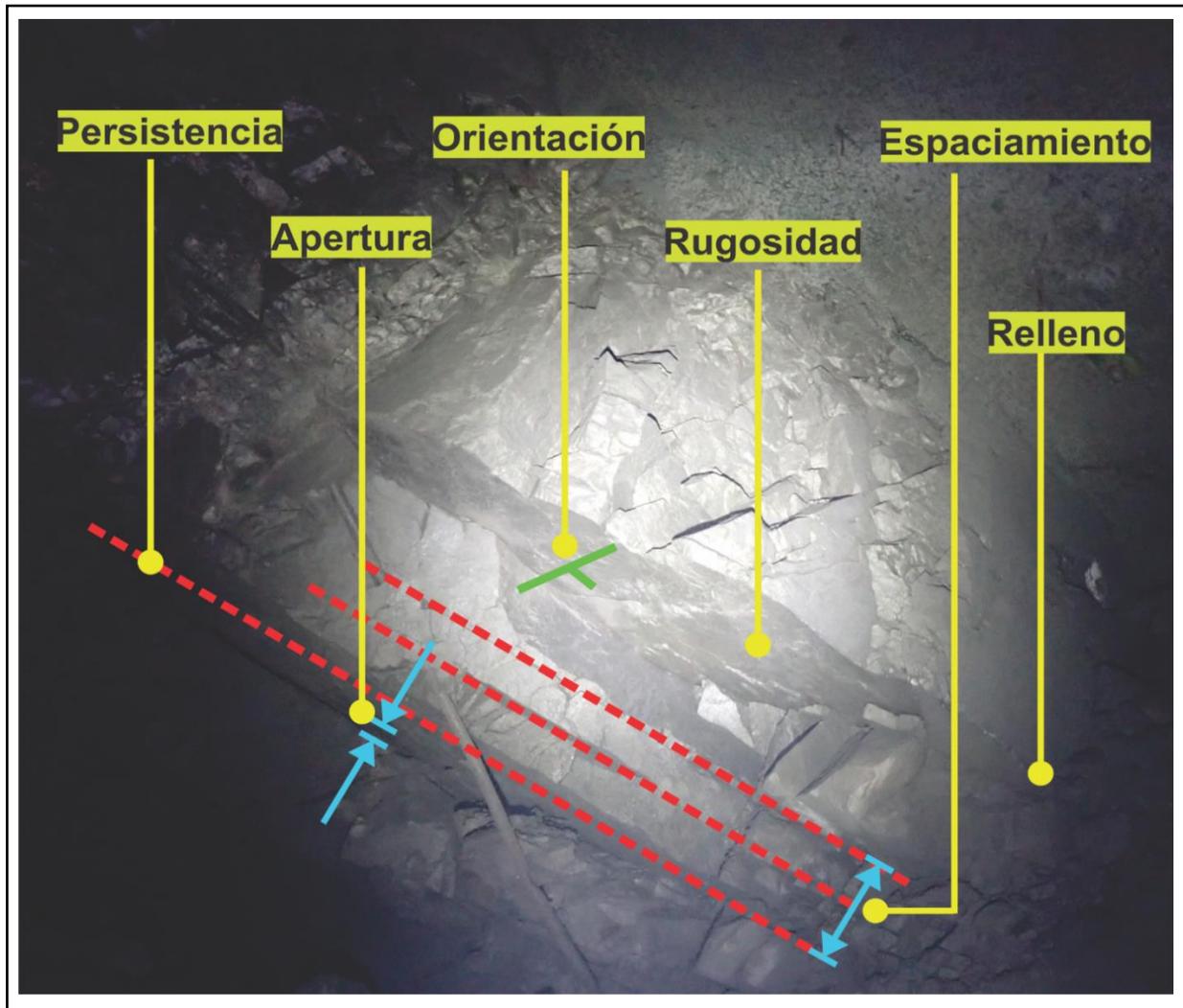


Figura 5: Espaciamiento y condición de las discontinuidades.

6.2.1.4.6. *Alteración y Meteorización*

Son 2 factores muy importantes que influyen en la resistencia de una roca y por ende la estabilidad del macizo. La meteorización genera situaciones más desfavorables debido a la exposición de la roca a factores climatológicos y morfológicos, se puede ver reflejada en el aumento de la apertura de las discontinuidades por relajamiento de la roca (meteorización física) o por descomposición de la roca por presencia de agua (meteorización química). Por otro lado, la alteración hidrotermal propiamente dicha, dada por el ascenso de fluidos magmáticos a altas

temperaturas a través del macizo rocoso, ofrece un panorama favorable como desfavorable; por ejemplo, la silicificación mejora considerablemente las competencias del macizo rocoso, en cambio, la argilitización genera un aumento de minerales arcillosos que se emplazaron generando rellenos blandos que hacen al macizo menos competente (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.2.1.5. Otros factores a considerar

Una adecuada caracterización geomecánica, involucra otros aspectos aparte de los ya mencionados, pues generalmente se presentan efectos adversos en cuanto a la estabilidad del macizo rocoso. Estos aspectos son: (1) la presencia de agua, ejerciendo presión y actuando como lubricante, acelerando el debilitamiento para la caída y/o deslizamiento de bloques de roca; (2) la presencia de esfuerzos o presiones de la roca, a medida que el minado aumenta en profundidad los esfuerzos también aumentan, y en zonas donde se concentran estos esfuerzos, exceden la resistencia de la roca que se traducen en potenciales caídas de roca y (3) la presencia de fallas regionales, pues facilitan la formación de cuñas que pueden deslizarse por efecto gravitacional (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.2.2. Clasificación geomecánica

Los sistemas de clasificación geomecánica se consideran una herramienta universal para caracterizar el macizo rocoso, proporcionando un valor cuantitativo en términos de la calidad del macizo rocoso, y a su vez, permitiendo estimar el sostenimiento en excavaciones subterráneas (Osinermin, 2017). Existen variedad de sistemas utilizados para caracterización geomecánica, entre los más conocidos y aplicados en minería subterránea están el sistema Q de Barton, et al. (1974), el sistema RMR (Valoración de la Masa Roca o *Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989) y el sistema GSI (Índice de Resistencia Geológica) de Hoek y Marinos (2000).

A continuación, se describen los 2 sistemas que se utilizan para en la mina El Roble:

6.2.2.1. Sistema RMR - Rock Mass Rating

El sistema de valoración de la masa rocosa o *Rock Mass Rating* (RMR) para la clasificación de macizos rocosos fue creado por Bieniawski en 1973 y modificado por el mismo autor en 1989; permite determinar la calidad del macizo rocoso de forma rápida y sencilla, y clasifica a los macizos de 0 a 100 puntos (Figura 6), siendo 0 para una roca de muy mala calidad y 100 para una roca de calidad muy buena, mediante la cuantificación de los siguientes parámetros (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004):

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca
- Rock Quality Designation (RQD)
- Espaciamiento de discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Presencia del agua subterránea

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
PARÁMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES							VALORACIÓN	
RESIST. COMP. UNIAXIAL (M Pa)	>250 (15)	X 100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	1	12		
RQD %	90-100 (20)	75-90 (17)	X 50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	2	13		
ESPACIAMIENTO (m)	>2 (20)	0,6-2 (15)	0,2-0,6 (10)	X 0,06-0,2 (8)	< 0,06 (5)	3	8		
CONDICIÓN DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	1-3 m Long. (4)	3-10mm (2)	X 10-20 m (1)	>20 m (0)	4A	1	
	APERTURA	Cerrada (6)	X <0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm (1)	> 5 mm (0)	4B	5	
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	X Lig.rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	4C	3	
	RELLENO	Limpia (6)	Duro < 5mm (4)	Duro>5mm (2)	X Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4D	1	
	ALTERACIÓN	Sana (6)	X Lig. Alterada. (5)	Mod.Alterada (3)	Muy Alterada. (2)	Descompuesta (0)	4E	5	
AGUA SUBTERRÁNEA	X Seco (15)	Humedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	5	15		
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 5) =								63	
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	II			
DESCRIPCIÓN	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA				

Figura 6: Ejemplo parámetros de clasificación y puntaje RMR de Bieniawski, 1989 (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.2.2.2. Sistema GSI - *Geological Strength Index*

El índice de resistencia geológica (GSI) es un sistema de clasificación cualitativa, se obtiene a partir de la observación del macizo rocoso, donde se evalúa la litología, estructura y estado de las superficies de las discontinuidades. Se considera una clasificación sólida, ya que, califica apropiadamente macizos rocosos blandos y heterogéneos cuando poseen $RMR < 20$, además, permite realizar una evaluación rápida y directa tanto en excavaciones subterráneas como superficiales (Marinos *et al.*, 2005) (Figura 7).

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICO GSI (Hoek & Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es más realista que fijar GSI=35. También notar que esta tabla no se aplica a mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultado de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja con un análisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
ESTRUCTURA		MUY BUENA Muy rugoso, Superficies frescas sin meteorización	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada, superficies con óxido.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimiento compacto o rellenos o fragmentos	MUY MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimiento de arcilla suave o rellenos
		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	Intacta o Masivo: Especímenes de roca intacta o masivo in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo rocoso no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades	80	70			
	Moderadamente Fracturado: Entrelazado, macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades		60	50		
	Muy Fracturado/Disturbado/Agrietada: Foliada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad			40	30	
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosos y redondeadas				20	
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta de formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte	N/A	N/A			10
		DISMINUYE EL ENTRELAZADO DE PEDAZOS DE ROCA ↓				

Figura 7: Carta de clasificación GSI para macizos rocosos a partir de las observaciones geológicas (Hoek y Marinos, 2000).

6.3. Sostenimiento

El sostenimiento corresponde a todos los materiales utilizados para asegurar, controlar y mantener la estabilidad de una excavación subterránea (túnel, mina), permitiendo así, acceder de forma segura a un frente de trabajo. Existen dos tipos de sostenimiento: 1) Sostenimiento pasivo, corresponden a los elementos que empiezan a actuar como soporte una vez exista deformación en el macizo rocoso como el concreto lanzado o *shotcrete*, cimbras metálicas y pernos cementados. 2) Sostenimiento activo, son los elementos que proporcionan refuerzo y/o estabilidad al macizo rocoso desde su instalación como pernos y cables de anclaje tensados. Así, el tipo de sostenimiento a instalar dependerá del servicio que prestará la excavación, las características del macizo rocoso, el equipo y los costos de instalación. Además, se debe prestar especial atención al tiempo transcurrido entre la ejecución de la excavación y posterior instalación del sostenimiento, ya que, en macizos rocosos de mala calidad el sostenimiento debe instalarse lo antes posible, mientras que en macizos de calidad buena se podrá retrasar un poco (Osinermin, 2017).

6.3.1. Elementos de sostenimiento en minería subterránea

Conociendo las variables que intervienen al momento de elegir algún tipo de sostenimiento, y la gran variedad de elementos de sostenimiento que se usan en minería subterránea, se presentan los soportes utilizados en la mina El Roble, que pueden ser usados bien sea combinados o individualmente:

6.3.1.1. Concreto lanzado o *Shotcrete* (SH)

Es el nombre genérico que se le asigna al concreto compuesto de cemento, agregados, agua, aditivos y elementos de refuerzo, los cuales son aplicados neumáticamente y compactados dinámicamente a alta velocidad sobre una superficie (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004). Este concreto bajo una adecuada relación de componentes y una buena técnica de

instalación cumple la función de sellar la superficie de la roca cerrando las fracturas y evita la descompresión y alteración de la roca (Osinergmin, 2017). Actualmente, en la mina El Roble, a la mezcla de concreto se añade fibras de acero y/o sintéticas para reforzarlo, comúnmente llamado *Shotcrete* reforzado, que se ha utilizado como base para la instalación de otros elementos como mallas electrosoldadas, pernos helicoidales y pernos *split set* (Figura 8).

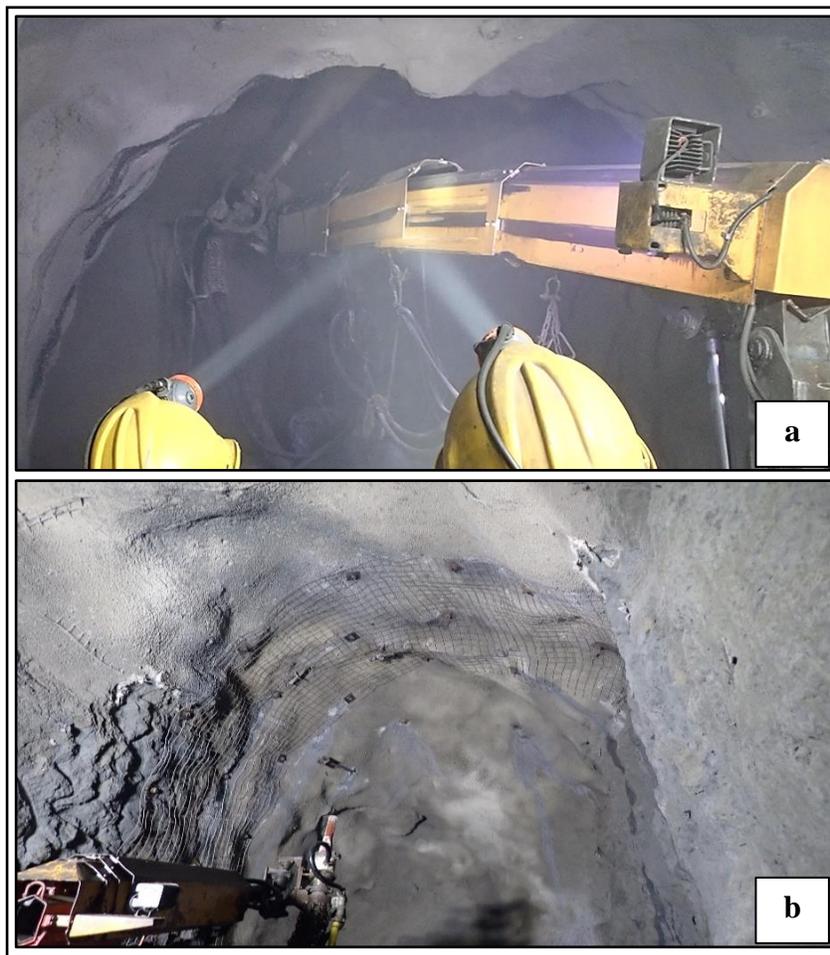


Figura 8: *Shotcrete*: a) Instalación de *shotcrete* con equipo mecánico *Robojet*. b) Labor sostenida por completo utilizando *shotcrete*, malla electrosoldada y perno *split set*.

6.3.1.2. Perno helicoidal (PH)

Es una barra de acero helicoidal cuya sección transversal es ovalada, con un sistema de fijación conformado por una placa de acero y una tuerca de fundición nodular, que tiene como función

principal reforzar y preservar la resistencia de un macizo rocoso (Prodimin, 2021). Su instalación requiere complementarse con cementantes como resinas y/o cartuchos cementantes que se incorporan dentro de la perforación antes de introducir la barra de acero para garantizar su adherencia a la roca (Martínez, 2019). En la mina El Roble, la capacidad de soporte individual de estos pernos es de aproximadamente 21 toneladas, por ende, es común encontrar este sostenimiento en labores permanentes y en zonas donde se presentan formación de cuñas de gran tamaño o en zonas donde los esfuerzos son altos (Figura 9).

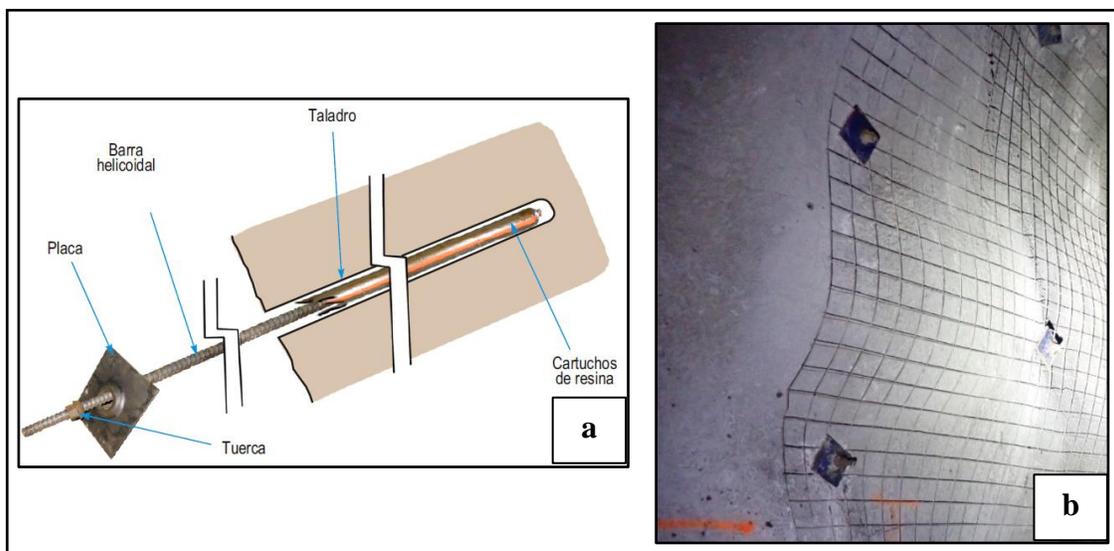


Figura 9: Perno helicoidal: a) Partes de un perno helicoidal (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004). b) Perno helicoidal instalado en hastial con shotcrete y malla electrosoldada.

6.3.1.3. Perno *Split set* (SS)

Es un tubo ranurado longitudinalmente, con un extremo cónico que se inserta en la perforación, y el otro extremo cuenta con un anillo que sirve para sujetar la planchuela de acero (Prodimin, 2021). Para la mina El Roble, la capacidad de soporte individual de este sostenimiento oscila entre las 9 y 12 toneladas, utilizado principalmente en labores temporales y como apoyo para sujetar bloques y/o cuñas de menor tamaño (Figura 10).

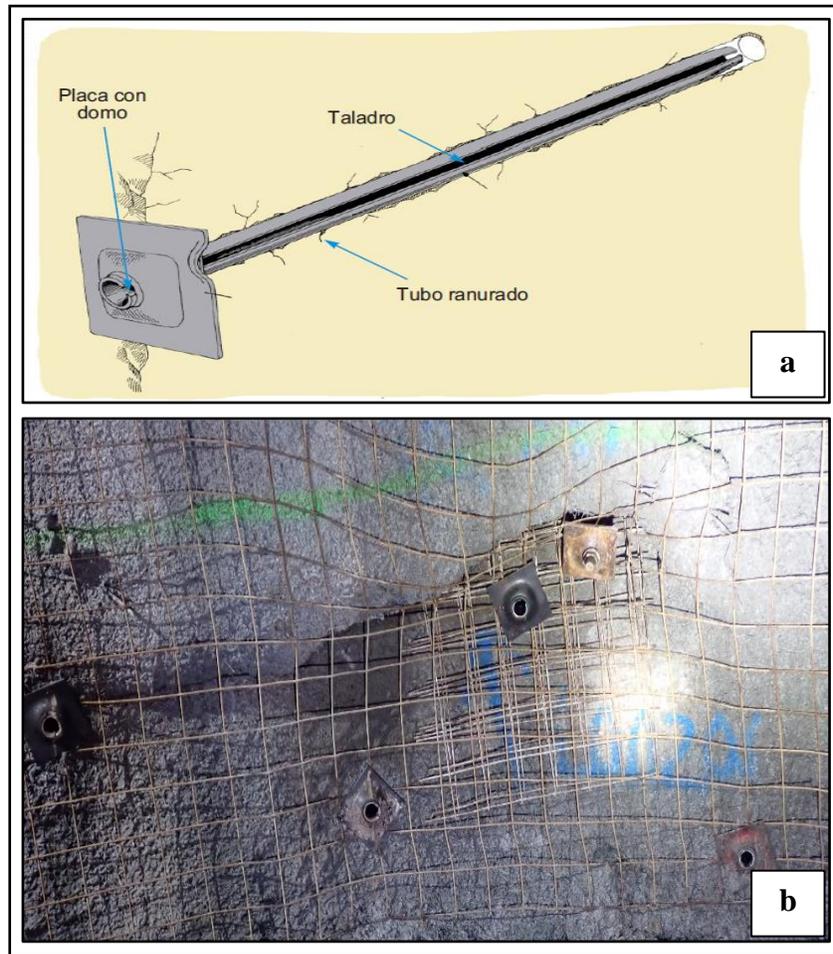


Figura 10: Perno *Split set*: a) Partes de un perno *Split set* (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004). b) Perno *split set* instalado en hastial con *shotcrete* y malla electrosoldada.

6.3.1.4. Malla electrosoldada (M)

Consiste en barras de acero lisas o corrugadas longitudinales y transversales que se intersectan en forma rectangular, electrosoldadas por fusión en sus intersecciones, y permite la distribución de los esfuerzos ejercidos por un macizo rocoso (Prodimin, 2021). En la mina El Roble, la instalación de esta malla se realiza tanto en techo como en hastiales, ya que, ha demostrado que en conjunto con pernos (helicoidal y/o *split set*) y el *shotcrete*, es un método muy eficaz para retener la caída roca en macizos donde el fracturamiento es intenso.

6.3.1.5. Enfilajes

Este sostenimiento consiste en incorporar dentro de una perforación una “lechada” de microcemento y una varilla de acero, buscando que además de adherir la varilla al macizo, se rellenen todas las fracturas. Se ha utilizado en labores permanentes y como pre-soporte en macizos rocosos de muy mala calidad.

6.3.1.6. Shotfer

Consiste en una estructura que involucra el uso de *shotcrete*, malla electrosoldada, perno *split set* y varillas de acero (Figura 11); este tipo de sostenimiento es de uso especial en labores permanentes donde la calidad del macizo es muy mala y se evidencia que la zona está bajo la influencia de esfuerzos muy altos. La instalación de este sostenimiento conlleva cierto grado de complejidad, en términos de tiempo y personal requerido, puesto que involucra realizar un lanzado de *shotcrete* de 3”, posteriormente la instalación de malla electrosoldada con *split set*, luego se sujeta el varillaje a la malla, formando secciones de 1 m x 1 m en cada intersección de este; requiere la instalación de un *split set*, para finalmente realizar un lanzado de *shotcrete* de 1” cubriendo toda la zona reforzada.

6.3.1.7. Cimbras metálicas

Son estructuras que se adaptan casi a cualquier excavación, compuestas por perfiles de acero (Figura 12), tienen una excelente resistencia mecánica (Prodimin, 2021), por lo tanto, se utilizan en casos extremos en labores permanentes, cuando la calidad del macizo rocoso es muy mala, donde la roca es deleznable o esta intensamente fracturada y el macizo está sometido a condiciones de altos esfuerzos. Este sostenimiento tiene las ventajas de ser resistente a la corrosión y de continuar prestando soporte aun después de sufrir fuertes deformaciones, lo que hace que perdure en el tiempo (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

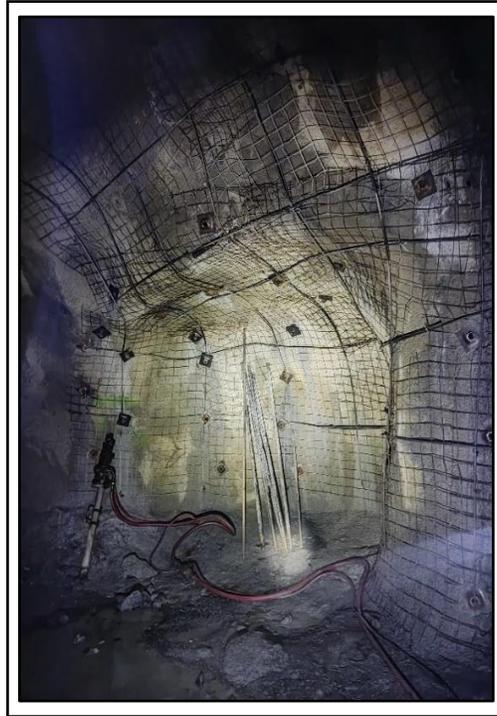


Figura 11: Labor en proceso de instalación de *Shotfer* con equipo manual *Jackleg*.

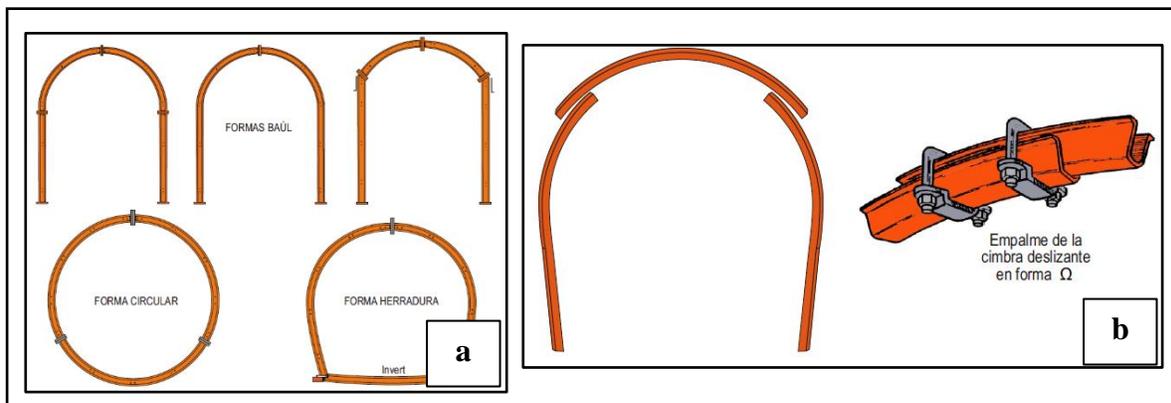


Figura 12: Cimbras metálicas: a) Tipos de cimbras rígidas. b) Cimbras deslizantes (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2004).

6.3.2. Estándar de sostenimiento mina El Roble

El sostenimiento de las labores constituye un proceso esencial para garantizar la seguridad del personal y equipos en cualquier excavación, y la mina El Roble no es la excepción, pues se ha destacado por ser una empresa minera comprometida en temas de gestión de la seguridad, por ende,

desde el Departamento de Geomecánica se ha desarrollado un estándar de sostenimiento que contiene especificaciones técnicas y/o criterios necesarios para implementarse a diario durante el minado. Con base a la investigación y la experiencia adquirida a lo largo de los años, este estándar se ha ido mejorando y ajustando, hasta su última versión del año 2017, en donde, se relaciona la clasificación RMR de Bieniawski y el sistema GSI evaluando la calidad del macizo rocoso para implementar el sostenimiento óptimo bien sea en una labor temporal (Ver Anexo IV).

6.4. Método de minado

La mina El Roble actualmente está explotando el cuerpo Zeus, donde el método de minado empleado es el método de corte y relleno en cámaras y pilares ascendente, este método genera menor perturbación a la masa rocosa del entorno del minado, utilizando el relleno para el restablecimiento del equilibrio; básicamente, consiste en extraer el mineral a través de franjas horizontales conocidas como cámaras o tajos, que posteriormente son llenados con relleno detrítico cementado (RDC) que es una mezcla homogénea de material estéril (relaves), cemento, aditivos y agua, que se ha diseñado para que alcance una resistencia de 9.5 MPa. De este modo, el método de minado propicia la división vertical del cuerpo Zeus en bloques, donde cada bloque se divide en niveles, estos son nombrados de acuerdo a la cota sobre el nivel del mar en que se encuentran (NV 1717, NV 1722, NV 1727, etc.), cada nivel se divide horizontalmente en paneles primarios y secundarios, por último, cada panel es dividido en tres tajos, cada tajo con dimensiones de 5 x 5 metros, lo que se ha llamado como un patrón en tablero de ajedrez (Figura 13). El nivel que separa cada bloque se denomina puente mineral, este cumple la función de contribuir a la estabilidad del macizo, por ende, la importancia de recuperarse una vez se complete el minado de los niveles superiores e inferiores.

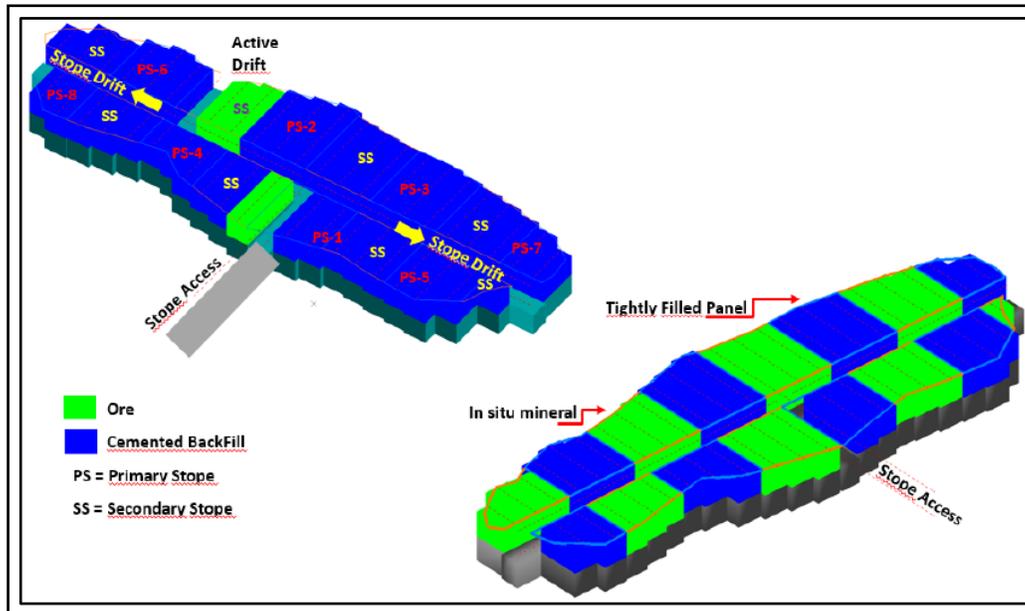


Figura 13: Patrón de explotación de niveles del cuerpo Zeus, mina El Roble (Kelly, 2021).

Así, para proceder a recuperar el mineral de un bloque, se seguirá el siguiente procedimiento:

1. Se accede desde la rampa hasta el centro del nivel más inferior del bloque, a través de una ventana (VE), que corresponde a una labor permanente dispuesta perpendicularmente al eje más largo del cuerpo (Figura 14a).
2. Desde donde termina la ventana, se accede a lo largo del eje longitudinal del cuerpo, a través de una galería (GA), dirigiéndose a la zona de contacto tanto al norte como al sur (Figura 14b).
3. Se procede a recuperar los paneles primarios, explotando y relleno inmediatamente con RDC en secuencia los tajos (TJ) uno, dos y tres (Figura 15). Cabe mencionar que, la explotación de un tajo no debe exceder las dimensiones de alto y ancho (5 m x 5 m), y el minado de este finaliza una vez se llega hasta los contactos de la roca caja, sin embargo, no se descarta la posibilidad de dejar un escudo como soporte. Además, es indispensable garantizar el llenado hasta el tope de estos con el RDC.

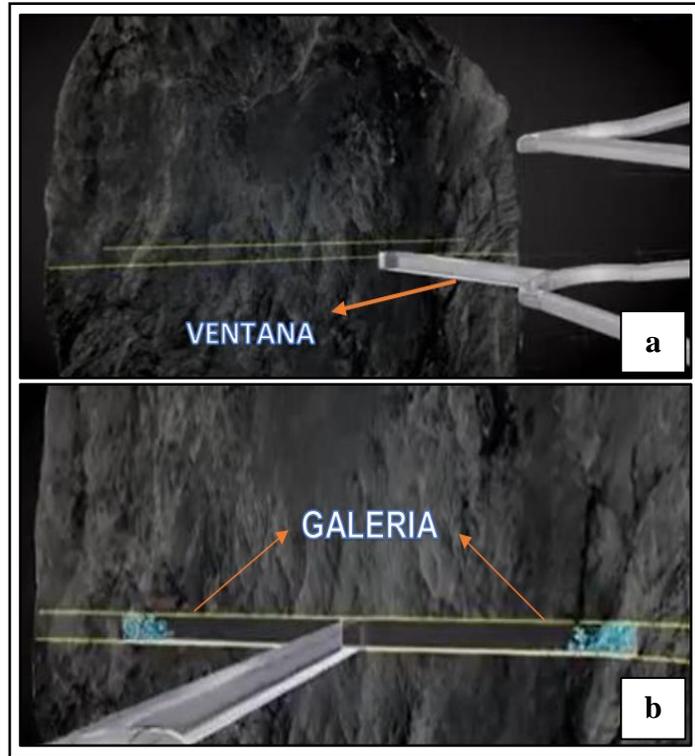


Figura 14: Accesos al nivel de explotación: a) Ventana de acceso. b) Galería de acceso (Departamento de Planeamiento, mina El Roble, 2017).

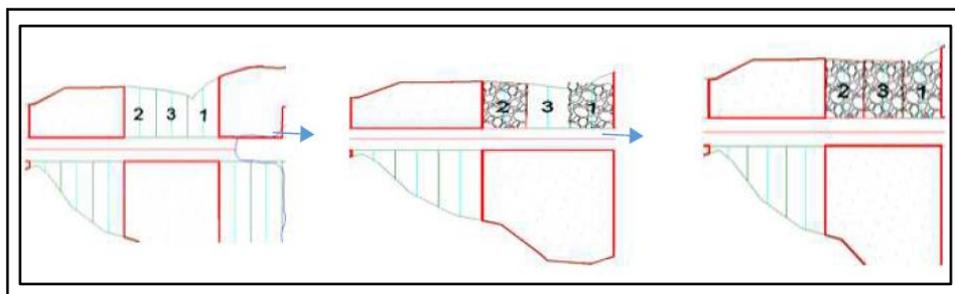


Figura 15: Secuencia de minado de paneles primarios (color azul) y paneles secundarios (color rojo) (Departamento de Planeamiento, mina El Roble, 2017).

4. Una vez se complete la recuperación de todos los paneles primarios de un nivel se procede a rellenar con RDC toda la galería.
5. Se repite el proceso de recuperación de los paneles primarios en los niveles superiores del bloque, al estar alineados verticalmente los paneles, se garantiza que, extrayendo todos los paneles primarios, los secundarios formen un pilar de mineral como soporte (Figura 16a).

6. Una vez se termine con la recuperación de los paneles primarios en todos los niveles, se repite el proceso descrito hasta el momento, pero esta vez, recuperando los paneles secundarios (Figura 16b).
7. Finalmente, como se mencionó, para completar el minado de un bloque, se procede a recuperar los puentes de mineral, con la misma metodología, recuperando y rellenando primero los tajos de paneles primarios y posteriormente tajos de paneles secundarios.

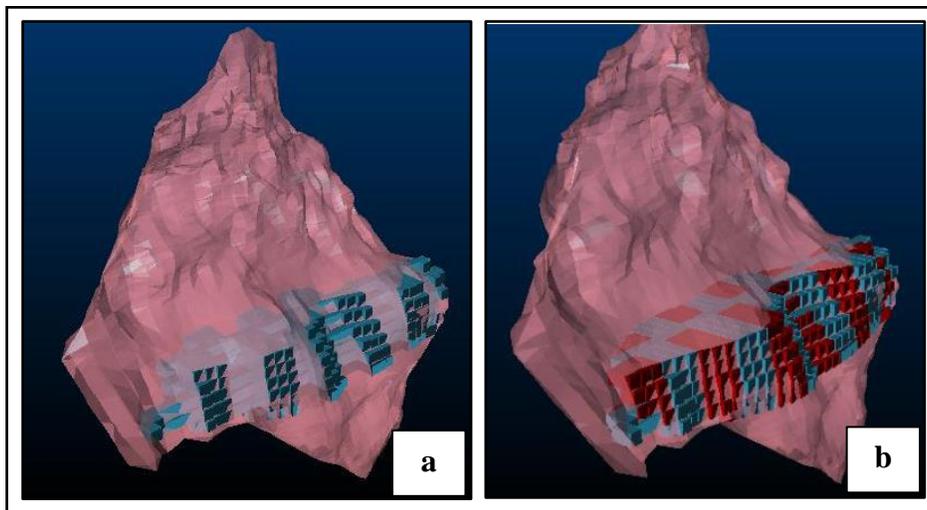


Figura 16: Distribución de paneles en los niveles del cuerpo Zeus: a) Paneles primarios con su respectiva división en tajos (color azul), nótese la alineación de los paneles secundarios formando un pilar de mineral. b) Paneles primarios (color azul) y paneles secundarios (color rojo) (Departamento de Planeamiento, mina El Roble, 2017).

6.4.1. Ciclo de minado

A partir del método de minado anteriormente descrito, es preciso mencionar las diferentes etapas que se desarrollan en un frente activo para la explotación del mineral. Así, estas etapas (Figura 17) incluyen las siguientes actividades:

1. Desate o percusión: consiste en desprender posibles bloques de roca del frente, techo y hastiales que han quedado desestabilizadas luego de la voladura, utilizando un equipo desatador (*Scaler*) o manualmente utilizando una barretilla minera.
2. Descargue: consiste recoger todo el mineral del frente y trasladarlo hasta una estación de carga o tolva, utilizando medios de transporte como *Scooptrams*, *Dumpers* y/o volquetas.
3. Sostenimiento inicial – *shotcrete*: consiste en realizar un lanzado de *shotcrete* con *Robojet* para prevenir la caída de roca, y habilitar el frente para el ingreso del personal.
4. Actividades parciales: se llevan a cabo trabajos por parte de topografía, geología y geomecánica, como marcación de frentes, levantamientos topográficos, control de tenor requerido, cartografía geológica y geomecánica, evaluación de la calidad del macizo rocoso, entre otros; con el fin de llevar un control de los avances de una labor.
5. Perforación: consiste en elaborar orificios cilíndricos conocidos como barrenos o taladros, utilizando un equipo de perforación mecanizado (*Jumbo*), que posteriormente permiten el cargue de explosivos.
6. Soporte final: se realiza la instalación total del sostenimiento recomendado utilizando un equipo empernador mecanizado (*Bolter*) desde el área de geomecánica.
7. Voladura y carguío: consiste en cargar los barrenos que se elaboraron en la perforación con una sustancia explosiva capaz de fracturar y remover el macizo rocoso, permitiendo iniciar nuevamente con el ciclo del minado.



Figura 17: Ciclo de minado mina El Roble (Ver explicación en el texto).

Algunos aspectos a considerar:

- La ventilación es indispensable en cada etapa, se expulsa el aire viciado y se garantiza un aire respirable para crear condiciones óptimas para el personal.
- A menudo, la evaluación de un frente por parte del área de Geomecánica, se realiza después de realizada la voladura, una vez se garantice una atmosfera libre de gases y desde una zona segura, esto con el fin de hacer una correcta caracterización geomecánica y una pronta recomendación del sostenimiento.
- Dependiendo de la calidad del macizo rocoso, la disposición de equipos y diferentes circunstancias de la mina, las etapas 5 y 6 pueden variar de orden.

7. Marco geológico

7.1. Geología Regional

La evolución geológica del noroeste de Colombia es el resultado de la acreción de terrenos alóctonos (arcos de islas y mesetas oceánicas) al margen continental desde el Cretácico, relacionados con la evolución de la placa del Caribe (Pardo-Trujillo et al., 2020). La evolución se reconstruyó con base a 4 eventos tectónicos, siendo así, el desarrollo del Arco Chocó – Panamá el resultado de los 2 primeros, de esta manera los eventos son: (1) la acreción del terreno Cañasgordas al margen continental separado por la sutura Garrapatas – Dabeiba durante el Maastrichtiano; (2) el emplazamiento del terreno El Paso – Baudó representado por la sutura San Juan – Sebastián hacia el Eoceno (Etayo et al., 1983; Duque-Caro, 1990); (3) posteriormente el levantamiento de la Sierra del Baudó, para el cual Bedoya et al. (2009) sugieren una edad de 8 - 4 Ma, y con este, la formación y desarrollo de las cuencas Atrato y San Juan, y finalmente (4) la formación de la trinchera colombiana (Bedoya et al., 2009) (Figura 18).

La mina El Roble se encuentra en rocas volcano-sedimentarias pertenecientes al Grupo Cañasgordas de edad Cretácico (Álvarez, 1971), el cual tiene una extensión aproximada de 800 km a lo largo de la Cordillera Occidental. El Grupo Cañasgordas se divide en 2 unidades, la primera de tipo volcánico, conocida como Formación Barroso y la segunda de tipo sedimentario denominada Formación Penderisco, esta última, se subdivide en Miembro Urrao y Miembro Nutibara (Álvarez y González, 1978) (Figura 19).

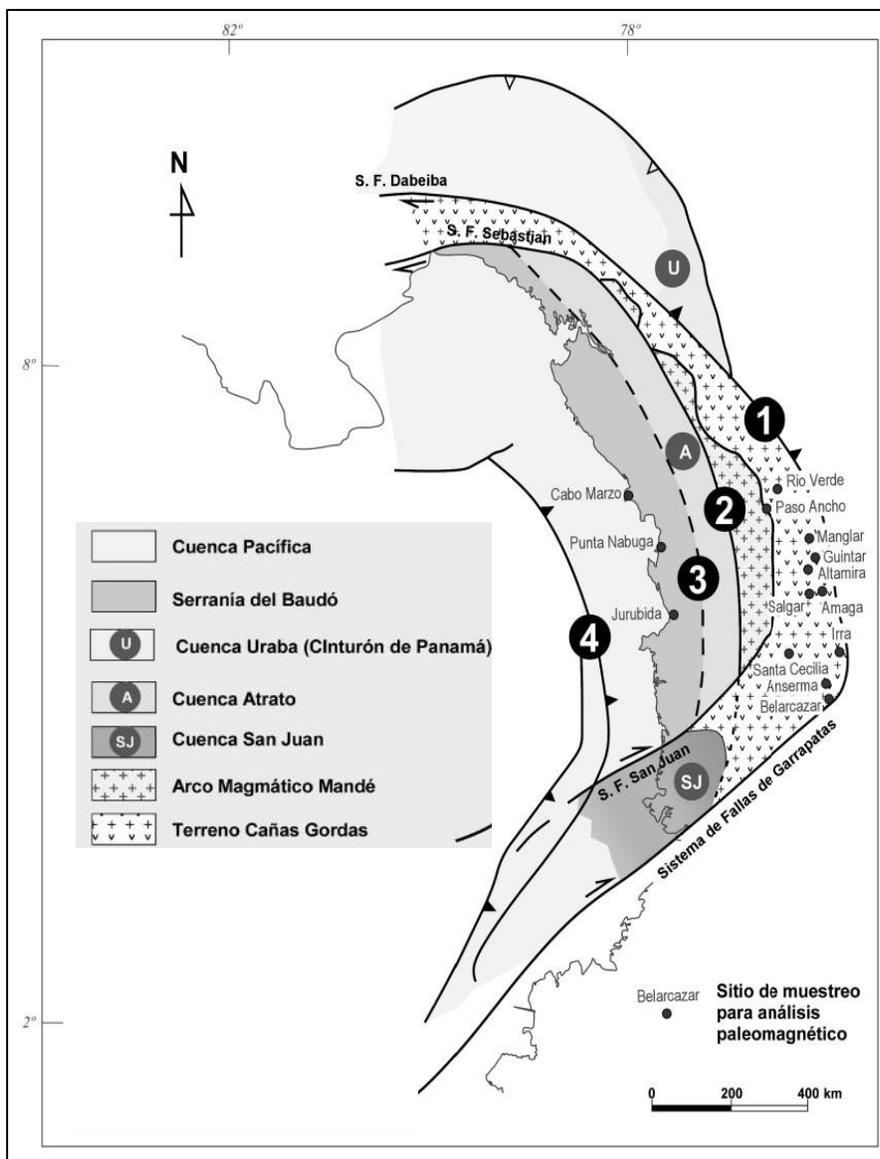


Figura 18: a) Evolución tectónica del noroeste de Colombia (Tomado y modificado de Bedoya et al., 2009).

7.1.1. Formación Barroso

La Formación Barroso ha sido asignada por distintos autores a diferentes rangos de edad. Por ejemplo, Rodríguez y Arango (2013) proponen una edad de Aptiano-Turoniano (115-88 Ma) fundamentados en método Ar/Ar, por otro lado, Etayo et al. (1983), sugiere una edad de Turoniano – Maastrichtiano a partir del contenido fósil. Litológicamente, Álvarez y González (1978) definen

la unidad como diabasas y basaltos espilitizados y uralitizados de color verde, localmente con estructura almohadillada, e interestratificados con tobas y chert negro. Rodríguez y Arango (2013) describen la unidad como basaltos y andesitas de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (An₄₀₋₅₀) y clinopiroxeno, en una matriz microcristalina a hialocristalina microlítica, localmente con amígdalas. Las tobas se han clasificado como tobas líticas, litocristalinas y vitreocristalinas. En general, las rocas presentan alteración a minerales secundarios como clorita, epidota, anfíbol uralítico, calcita, saussurita y sericita. En el área de El Carmen de Atrato (Chocó), la litología general está relacionada con intercalaciones de diabasa y chert negro, con una intensa mineralización hidrotermal a lo largo de la mina El Roble (Álvarez y González, 1978; Kelly, 2021).

7.1.2. Formación Penderisco

La Formación Penderisco corresponde a la parte sedimentaria del Grupo Cañasgordas, la cual se subdivide en 2 unidades, una areno-arcillosa denominada Miembro Urrao y otra calcareo-lítica denominada Miembro Nutibara (Álvarez y González, 1978). La edad sugerida para esta unidad según Restrepo et al. (1979) es Albiano – Coniaciano 95 ± 5 Ma, fundamentados en método K/Ar.

7.1.2.1. Miembro Nutibara

Este miembro corresponde a la parte sedimentaria del Grupo Cañasgordas; está constituido por delgadas capas de lodolitas silíceas de color gris claro a negro (chert) intercaladas con calizas de color claro, los estratos varían de 10 a 30 cm de espesor (Álvarez y González, 1978), el espesor de la unidad se desconoce; sin embargo, Calle y Salinas (1986) sugieren un espesor de máximo 1000 metros; además, mencionan que los contactos del Miembro Nutibara son fallados, teniendo así hacia el este el Miembro Urrao y hacia el oeste la Formación Santa Cecilia. La edad de depositación

sugerida para esta unidad es Turoniano-Campaniano, basado en asociaciones de foraminíferos planctónicos y bentónicos, indicando condiciones de aguas relativamente profundas, sin influencia terrígena (Arboleda et al., 2009).

7.1.2.1. Miembro Urrao

Este miembro está constituido en su mayoría por arenitas lodosas de grano fino a medio, localmente areniscas intercaladas con lentes de conglomerados polimícticos y chert, arcillolitas de color gris verdoso a pardo y limolitas de color gris oscuro (Álvarez y González, 1978). Se caracteriza por presentar un intenso plegamiento que varía en su forma, amplitud, sentido de buzamiento y fallamiento frecuente. Según Pardo-Trujillo et al. (2020), la principal fuente de sedimentos de esta unidad, fue el paleomargen continental, relacionado con abanicos submarinos acumulados en diques, canales y lóbulos en sistemas depositacionales cortos, con vulcanismo coetáneo.

El Miembro Urrao tanto al este como oeste, se encuentra en contacto fallado, teniendo así al este a la Formación Barroso y al oeste el Miembro Nutibara (Calle y Salinas, 1986). Pardo-Trujillo et al. (2020), sugieren una edad máxima de depósito de 79-73 Ma (Campaniano – Maastrichtiano) basados en información de circones detríticos y de macro y microfósiles.

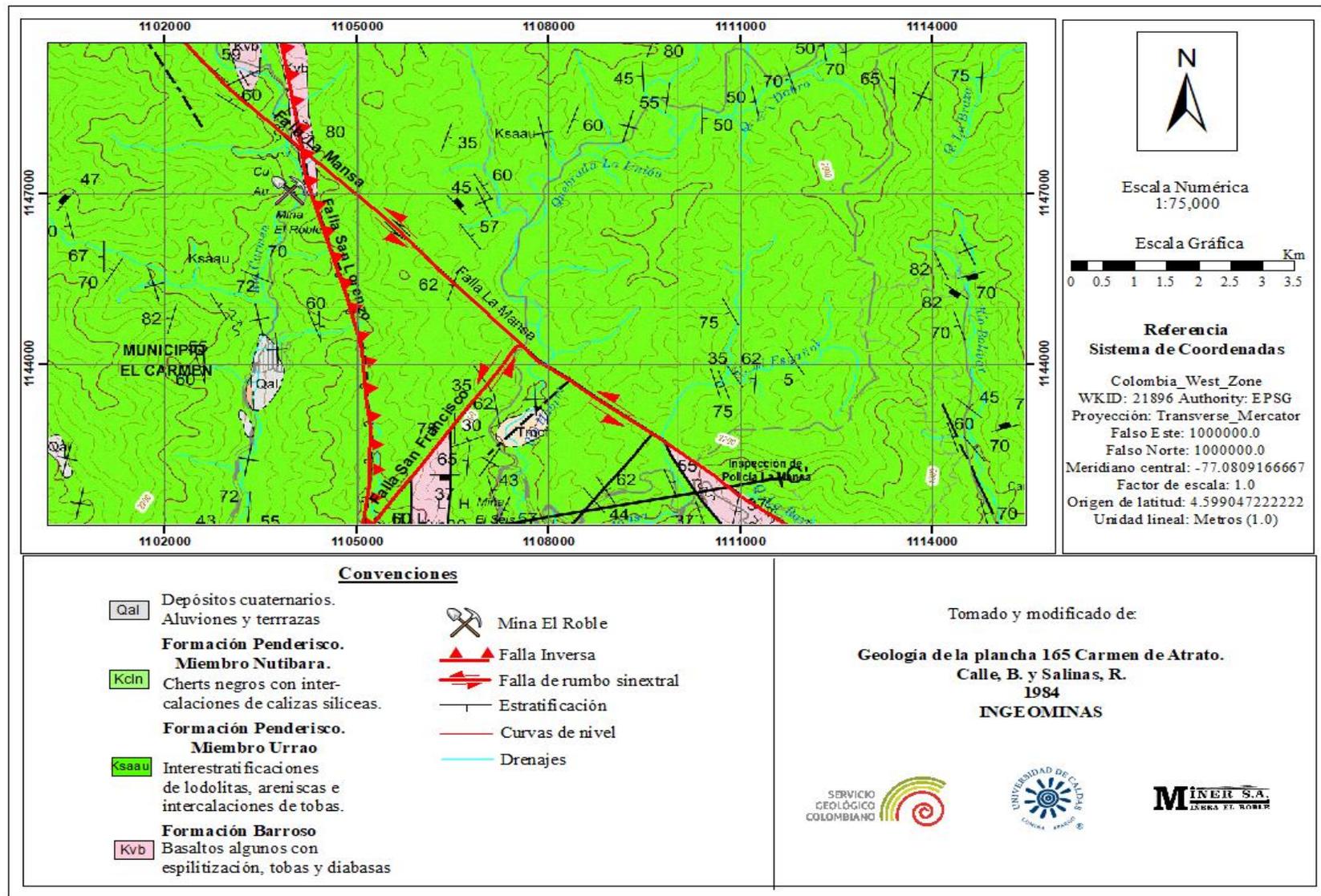


Figura 19: Mapa geológico regional Proyecto el Roble. (Tomado y modificado de Calle et al., 1984).

7.1.3. Geología Estructural

De acuerdo a la observación de zonas de cizalla, cambios litológicos, rasgos geomorfológicos y rasgos morfotectónicos (a veces obstruidos por el abundante material vegetal), se presume que el área es tectónicamente activa, siendo influenciada por sistemas de fallas con orientación preferencial SE-NW, SW-NE y N-S (Calle y Salinas, 1986).

7.1.3.1. Falla La Mansa

Esta estructura exhibe una dirección SE-NW con buzamiento preferencial hacia el Este, de carácter normal y presuntamente con componente en rumbo sinestrolateral; a grandes rasgos se manifiesta controlando el drenaje del río Bolívar y provocando grandes deslizamientos. Se considera de interés, pues a partir del trazo de la misma se han identificado cuerpos de basaltos y cherts con vestigios de sulfuros de geometría lenticular, indicando la procedencia de un cuerpo mineralizado de mayor dimensión similar al depósito de la mina El Roble (Calle y Salinas, 1986).

7.1.3.2. Falla San Lorenzo

La estructura presenta una dirección N-S, con buzamiento de alto ángulo hacia el Este y de carácter inverso; se evidencia en cabalgamientos de basaltos de la Formación Barroso sobre rocas sedimentarias del miembro Urrao, perteneciente a la Formación Penderisco (Espinal, 2020).

7.1.3.3. Falla San Francisco

Es una estructura con dirección SW-NE, buzando preferencialmente hacia el Este. Es una falla de rumbo de tipo sinestrolateral, evidenciada por los alineamientos de valles y silletas laterales; además, localmente desplaza la Monzodiorita de Farallones (Arboleda et al., 2009).

7.2. Geología Local

Para la mina El Roble, se identifican y utilizan cuatro clasificaciones principales para describir los basaltos pertenecientes a la Formación Barroso y las rocas volcano-sedimentarias de la

Formación Penderisco (Kelly, 2021), las cuales se disponen estratigráficamente de la más antigua a la más joven así: basaltos (Kv), chert negro (Kbc), chert gris (Kgc) y una secuencia sedimentaria (Kss). Además, se describe el sulfuro masivo (MS) y un paquete de rocas intrusivas (Tad) (Figura 20).

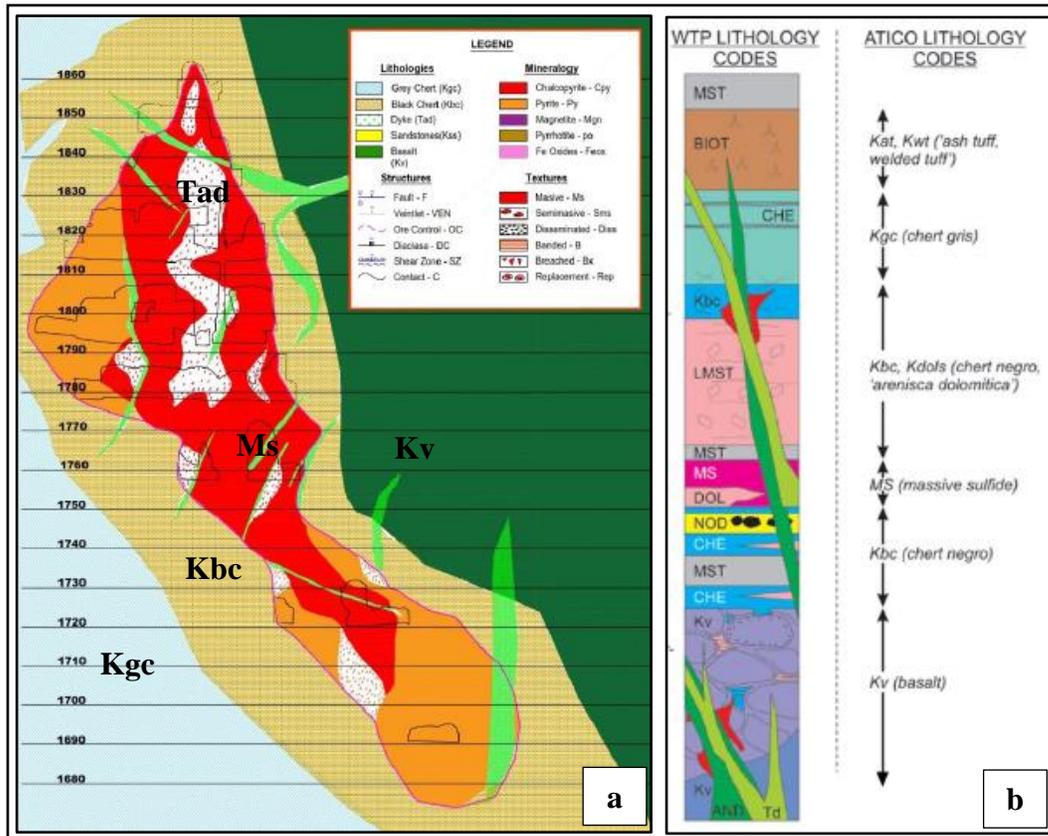


Figura 20: a) Sección transversal esquemática del cuerpo de Zeus, depósito El Roble (Kelly, 2021). b) Columna estratigráfica, depósito El Roble (Pratt, 2014).

7.2.1. Basaltos (Kv)

Rocas volcánicas máficas pertenecientes a la Formación Barroso, las cuales constituyen el basamento del yacimiento, de varios kilómetros de espesor de afinidad toleítica tipo MORB (Ortiz et al., 1990); su forma es masiva a almohadillada, generalmente de textura afanítica, la composición mineralógica de plagioclasas y anfíbol es uniforme, notándose cierto grado de alteración del anfíbol a clorita y epidota generando una tonalidad verde oscura a verde grisácea (Figura 21).



Figura 21: Basalto (Kv) con tonalidad verdosa, con rellenos de calcita.

7.2.2. Chert Negro (Kbc)

Suprayace a los basaltos y corresponden a la roca caja del sulfuro masivo, se caracteriza por ser carbonoso (de ahí su color y nombre), presentar estratificación, con variaciones a chert nodular, ausencia de fósiles, y continuos vetilleos de carbonatos (Figura 22). Cabe destacar que los contactos tanto con el basalto y el sulfuro masivo son generalmente fallados.

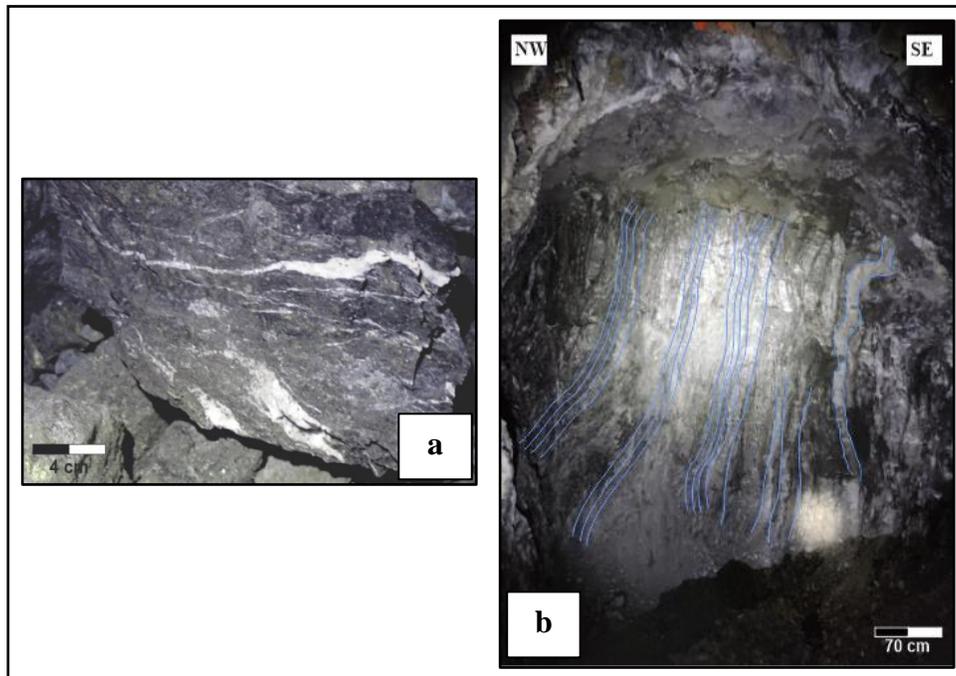


Figura 22: Chert negro (Kbc): a) Bloque de chert negro con rellenos de calcita y arrastres de sulfuro. b) Afloramiento de chert negro, nótese que se puede reconocer la estratificación y el desarrollo de pliegues en el mismo.

7.2.3. Chert Gris (Kgc)

Conforme se asciende estratigráficamente, el chert negro adquiere una tonalidad más grisácea, permitiendo separar la unidad como chert gris (Kgc), en esta se reconoce fácilmente la estratificación (estratos de 10 a 30 cm) y una laminación muy distintiva, presenta superficies de falla muy marcadas, un alto grado de plegamiento, abundantes rellenos de carbonatos y un alto grado de silicificación, lo que hace que sea más competente que el chert negro (Espinal, 2020).

7.2.4. Secuencia sedimentaria (Kss)

Cubriendo toda la sección la estratificación presenta una intercalación de lodolitas, areniscas, grawacas y arcosas de gran espesor, de color marrón muy característico, con rellenos de carbonatos, bandas milimétricas de sulfuros, material piroclástico como ceniza volcánica y algunos niveles presentan una aparente bioturbación (Espinal, 2020).

7.2.5. Sulfuro Masivo (Ms)

El sulfuro se encuentra emplazado en rocas de chert negro, entre sus características se destaca su forma lenticular con dimensiones entre 50 y 130 m de largo y una potencia de 20 a 45 m limitado por fallas, la mineralización predominante son sulfuros masivos y semimasivos, estratiformes de grano fino donde predomina la pirita y calcopirita, generando una tonalidad dorada y en menor proporción pirrotina, magnetita y esfalerita generando un color más grisáceo a negro, las diferentes discontinuidades presentan sucesivos rellenos de calcita y/o cuarzo, este último a veces con variación a jaspe aumentando considerablemente la resistencia del sulfuro y por ende, mejorando la calidad del macizo (Figura 23).

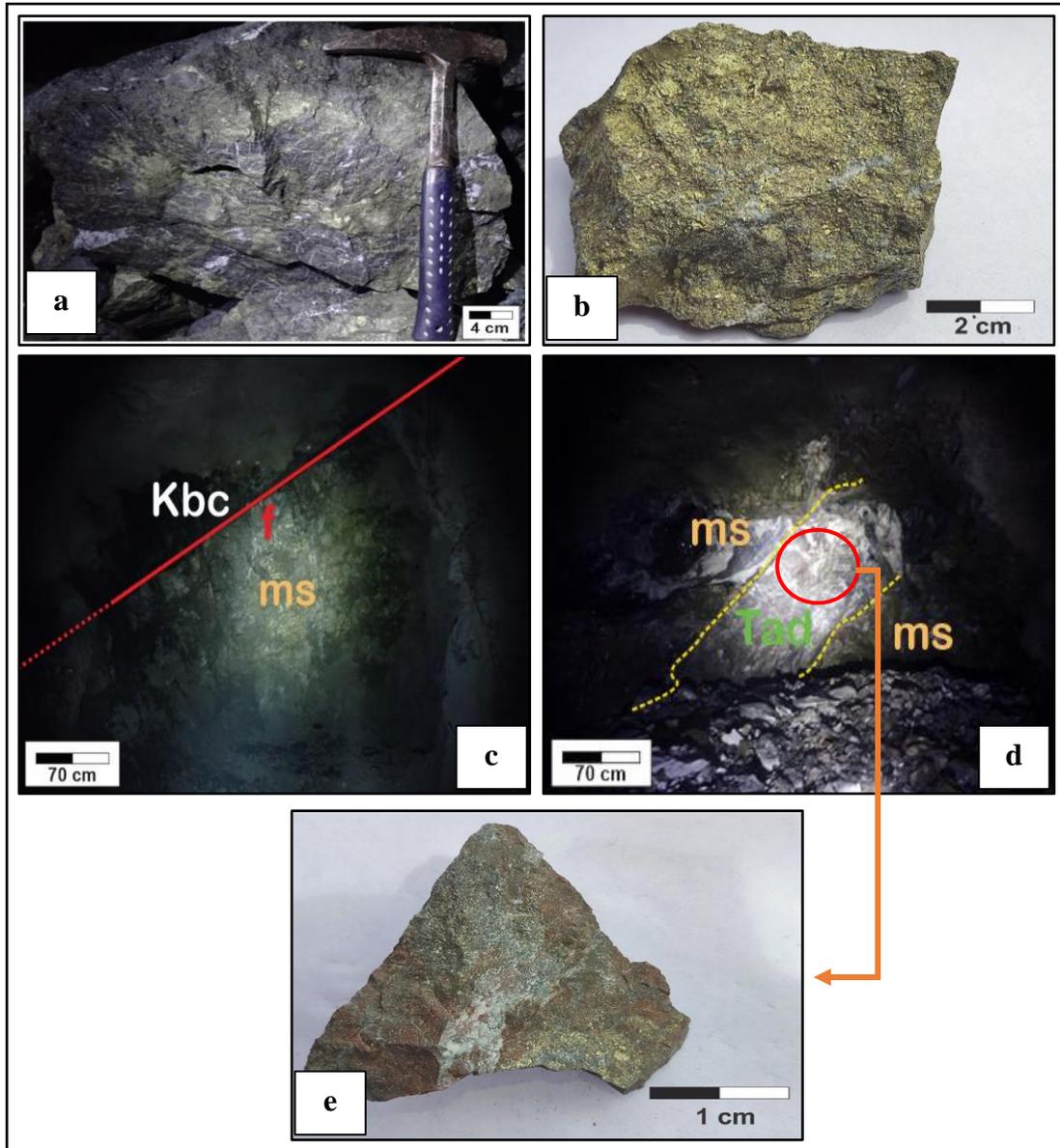


Figura 23: Mineralización del cuerpo de Zeus, depósito El Roble: a) Sulfuro semimasivo con rellenos de calcita. b) Sulfuro masivo con típica tonalidad dorada. c) Contacto fallado entre el chert negro (Kbc) y el sulfuro masivo (ms). d) Intrusión de dique andesítico (Tad) en sulfuro masivo (ms) con arrastres de chert negro, e) Andesita de textura afanítica, nótese el color rojizo por la presencia de jaspe.

7.2.6. Diques andesíticos (Tad)

En general, toda la sección está siendo intruida por diques de composición acida principalmente andesitas, Brito et al. (2010) sugiere que son de edad Mioceno, con una edad de cristalización entre

16-17 Ma, basado en dataciones Ar/Ar. Estas andesitas se caracterizan por presentar dos texturas diferentes, la primera con textura porfirítica donde se puede observar los fenocristales de plagioclasa y anfíbol, embebidos en una matriz hipocristalina, y otra de textura afanítica, en general de color gris a gris verdoso, su potencia varia de decímetros a metros (Figura 24).

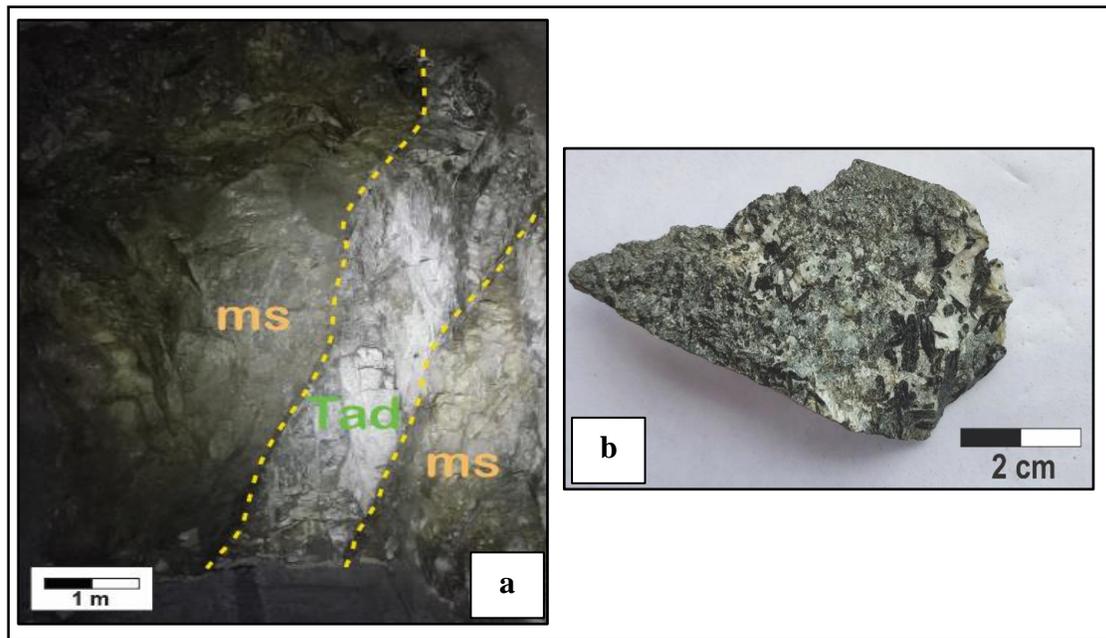


Figura 24: Mineralización del cuerpo de Zeus, depósito El Roble: a) Intrusión de dique andesítico (Tad) en sulfuro masivo (ms), b) Andesita de textura porfirítica, nótese los fenocristales de anfíbol.

7.3. Geología estructural local

El depósito del proyecto El Roble, presenta un fuerte control estructural, que se refleja tanto en una secuencia volcanosedimentaria volcada, como en la geometría lenticular de los cuerpos mineralizados, todo esto, resultado del desmembramiento del cuerpo original de mayores dimensiones. Las estructuras presentes indican un régimen de deformación frágil-dúctil, que permite el desarrollo de discontinuidades (fallas y diaclasas) y pliegues, los cuales se intensifican en cercanías de las zonas de contacto litológico (Espinal, 2020).

7.3.1. Fallas

Dentro de la mina se evidencia una serie de fallas locales las cuales se consideran “satélites” de una estructura mayor como lo es la Falla La Mansa (Espinal, 2020). Con base en observaciones de campo, estas fallas se caracterizan por ser continuas tanto en rumbo como en profundidad, con buzamientos muy variables, de carácter normal e inverso (Figura 25) y en ocasiones con componentes en rumbo sinestrolateral y dextrolateral. Estas estructuras, facilitan el emplazamiento de los diques, y en las unidades volcanosedimentarias se denota que el fallamiento es subparalelo a la estratificación. Por otro lado, en las superficies de fallas es común encontrar desarrollo de salbanda e indicadores cinemáticos como estrías y escalones de fallas, que por supuesto requieren un análisis más amplio para determinar una dirección de movimiento.

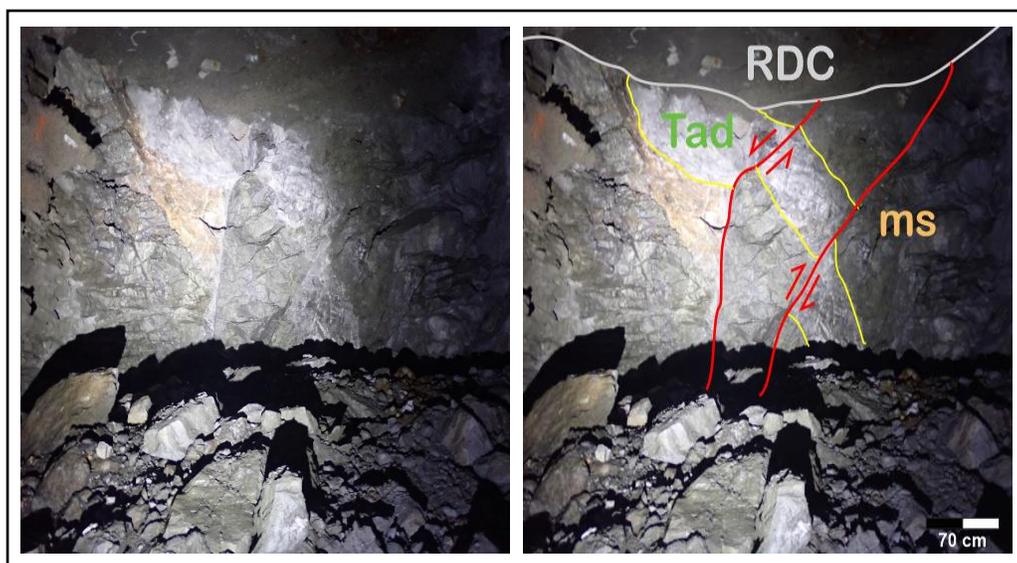


Figura 25: Fallas de carácter normal e inverso cortando dique andesítico (Tad) en sulfuro masivo (ms).

7.3.2. Diaclasas

Como consecuencia de las fallas locales que perturban el depósito, se presenta un diaclasamiento muy bien definido, que puede variar de una hasta cuatro familias de diaclasas, con

la particularidad de que la mayoría de las veces pueden presentar un patrón de orientación obedeciendo a diferentes tensores de esfuerzos aún desconocidos. Es importante destacar que existen zonas donde el diaclasamiento es intenso y este impide la correcta determinación de las fallas.

Desde la Geomecánica es preciso la evaluación de estos dos tipos de discontinuidades, puesto que como se ha mostrado, las condiciones en que se presenten estas variables definen tanto la estabilidad como la calidad del macizo rocoso.

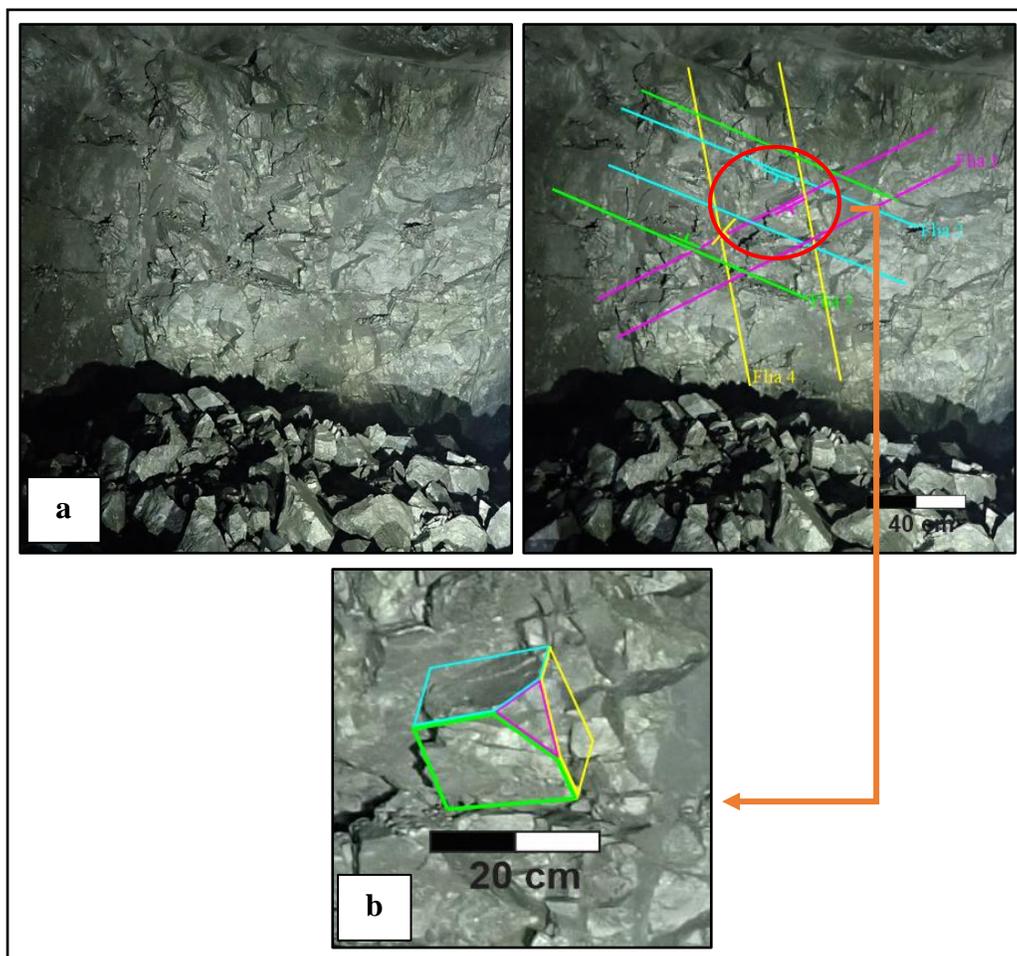


Figura 26: Diaclasamiento del cuerpo de Zeus, depósito El Roble: a) Disposición de 4 familias de diaclasas. b) Bloques de sulfuro, nótense las caras en los bloques que yacen en el piso como en los que están colgando.

7.3.3. Pliegues

El plegamiento se reconoce principalmente en las unidades sedimentarias (Kbc – Kgc), asociado a zonas de cizalla, aunque se ha logrado identificar pliegues tipo Chevron en el sulfuro; desarrollando así, pliegues asimétricos de orden centimétrico hasta métrico, con vergencia predominante hacia el noreste (NE) (Figura 27).

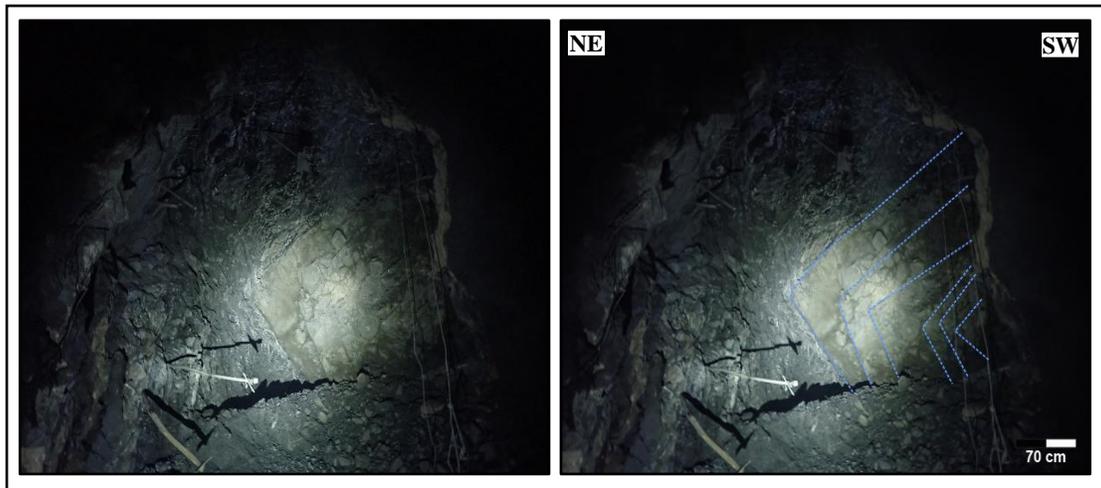


Figura 27: Pliegue tipo Chevron desarrollado en sulfuro.

7.3.4. Zonas de cizalla

Las zonas de cizalla se logran observar fácilmente tanto en zonas de contacto litológico o también en áreas próximas a este, donde se desarrollan estructuras tipo *pinch and swell*, tipo *boudin*, estructuras S-C y porfiroblastos (Figura 28).

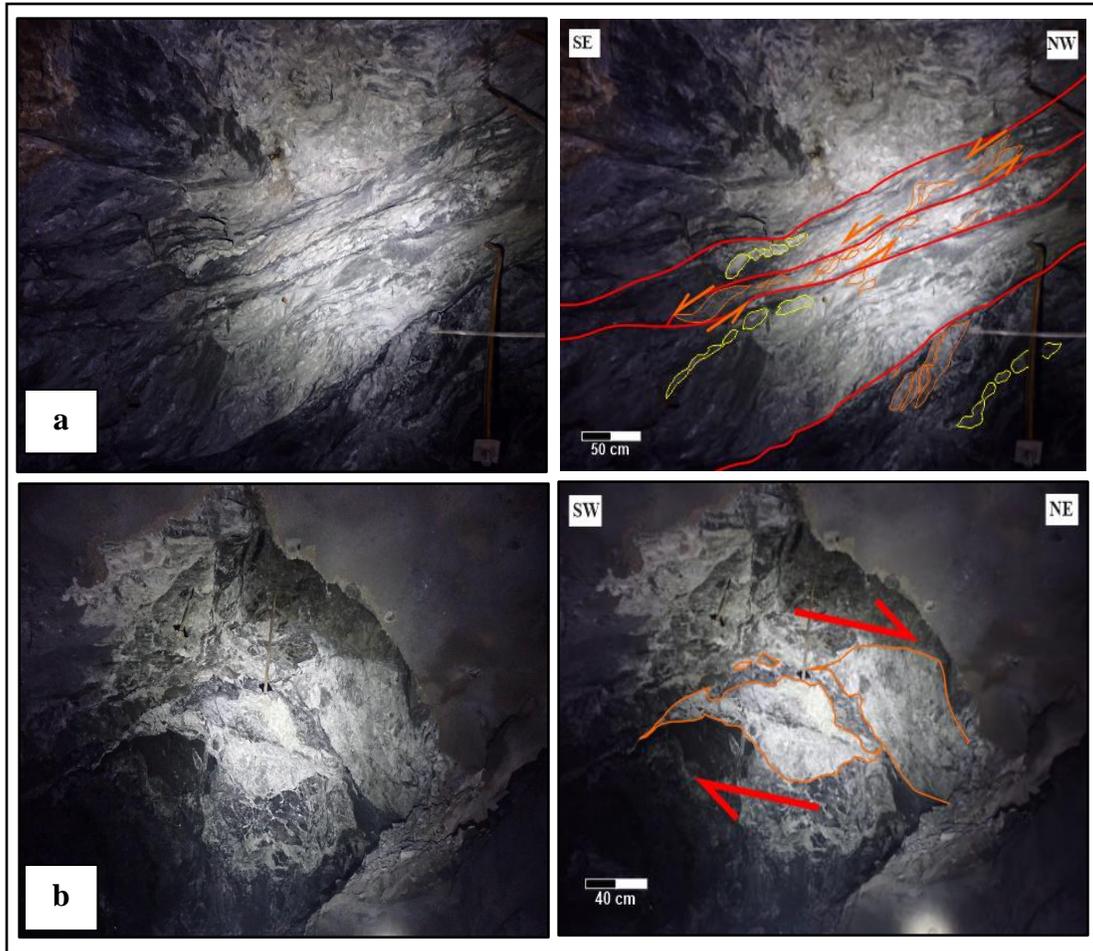


Figura 28: Zonas de cizallamiento: a) Zona de contacto entre dique y chert negro donde se observa grietas de extensión escalonadas que sugieren eventos sobreimpuestos (Falla normal y falla inversa. b) Blasto de dique evidenciando un fallamiento normal.

7.3.5. Modelo estructural

Dependiendo del entorno y naturaleza geológica, las rocas pueden presentar comportamientos diferentes como respuesta a la deformación que generalmente ocurre de manera progresiva, haciendo que los esfuerzos en la misma unidad litológica varíen y se generen diferentes estructuras geológicas y en consecuencia problemas de inestabilidad dentro de una labor subterránea. En concordancia con lo anterior, se realizó un análisis a escala global de las características físicas de los sistemas de discontinuidades en las labores subterráneas, este permitió reconstruir las

estructuras geológicas principales y desarrollar un modelo estructural tridimensional donde se evidencia dos tendencias predominantes: la primera, presenta un buzamiento medio de 87° y una dirección de buzamiento media de 180° ; la segunda, presenta un buzamiento medio de 43° y una dirección de buzamiento media de 85° (Figura 29).

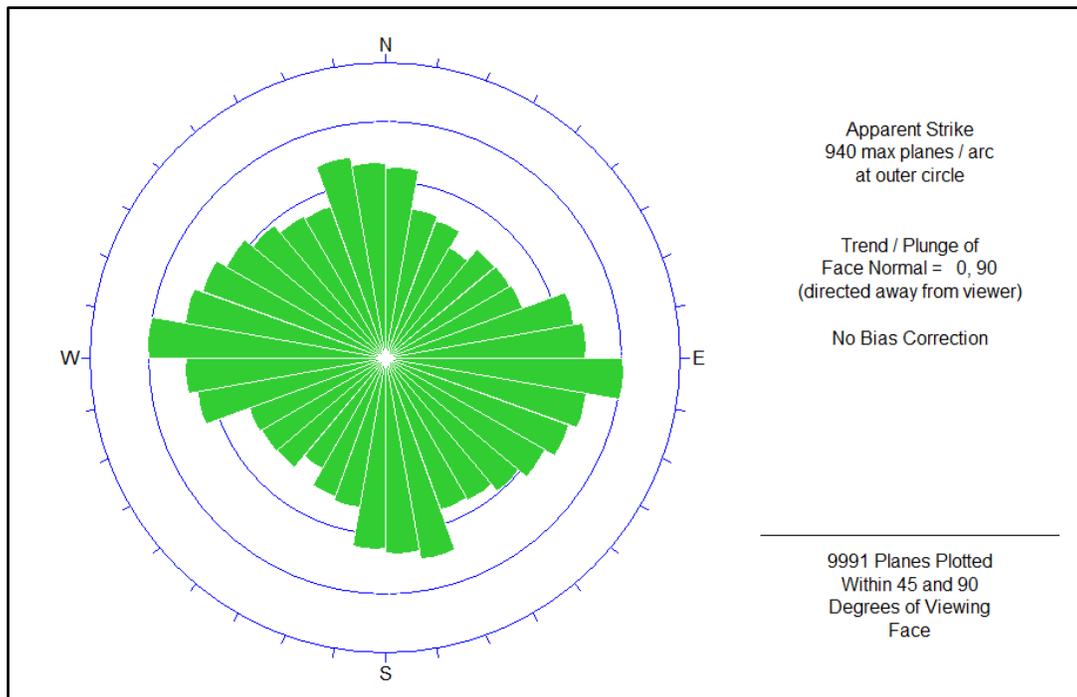


Figura 29. Diagrama de roseta (software DIPS). Nótese una tendencia $87^\circ/180^\circ$ y otra tendencia $43^\circ/85^\circ$.

Para realizar el modelo, se implementó el consolidado de la base de datos existente en el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble e información recolectada durante el trabajo de campo. Inicialmente, se definió los niveles pertenecientes al cuerpo “Zeus”, y haciendo uso del *software AutoCAD* se validó la información presente en los planos de cada nivel. De este modo, se definieron un total de 30 niveles iniciando en el nivel 1692 (NV_1692) hasta el nivel 1860 (NV_1860). Luego, se realizó la correlación en rumbo de las discontinuidades de cada nivel, logrando identificar un total de 16 discontinuidades principales (fallas geológicas) (Figura 30), numeradas como falla 1, falla 2, falla 3, etc. Además, se implementó el *software DIPS* para procesar

la amplia data estructural existente y generar un diagrama de roseta (Figura 29), que permite constatar las tendencias obtenidas.

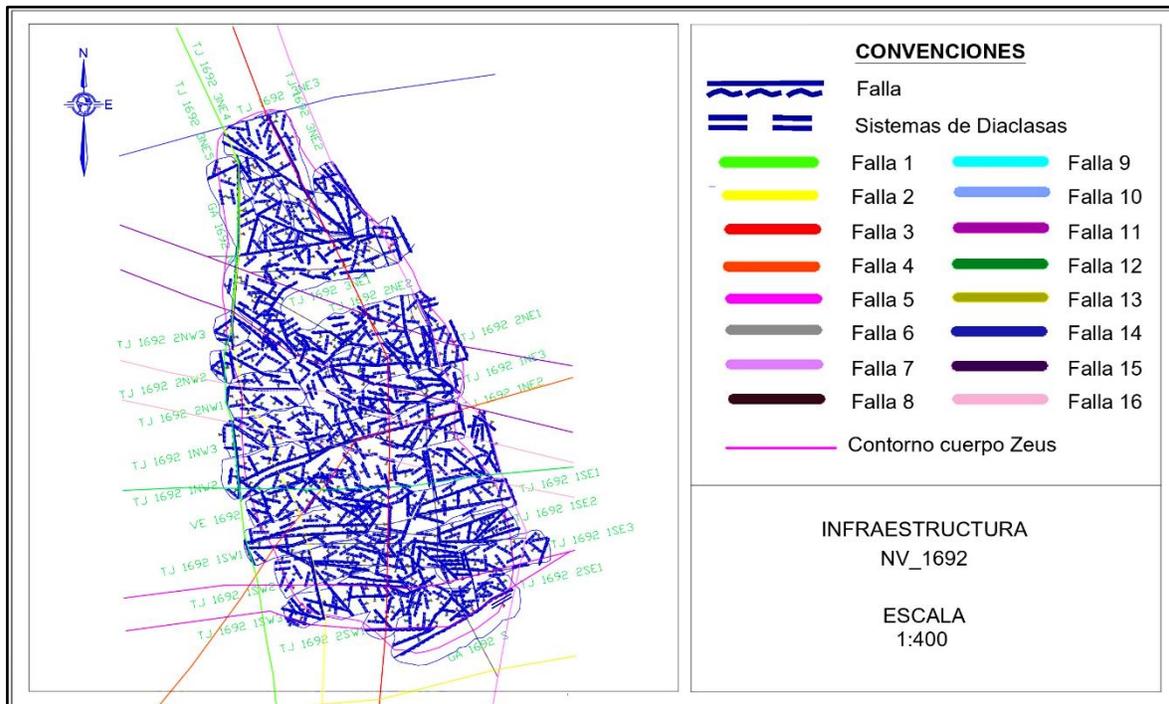


Figura 30. Ejemplo correlación de fallas principales en el nivel 1692 (NV_1692) utilizando el *software AutoCAD*.

Posteriormente, con el *software STUDIO RM (DATAMINE)* se realizó la correlación en profundidad, generando así el modelo estructural tridimensional. Dada las dos tendencias predominantes que el modelo sugiere, se presenta la vista en planta y perfil de cada una de ellas (Figura 31), donde se puede observar que las estructuras en general presentan un buzamiento de alto ángulo ($>45^\circ$) y una dirección de buzamiento preferencial hacia el E.

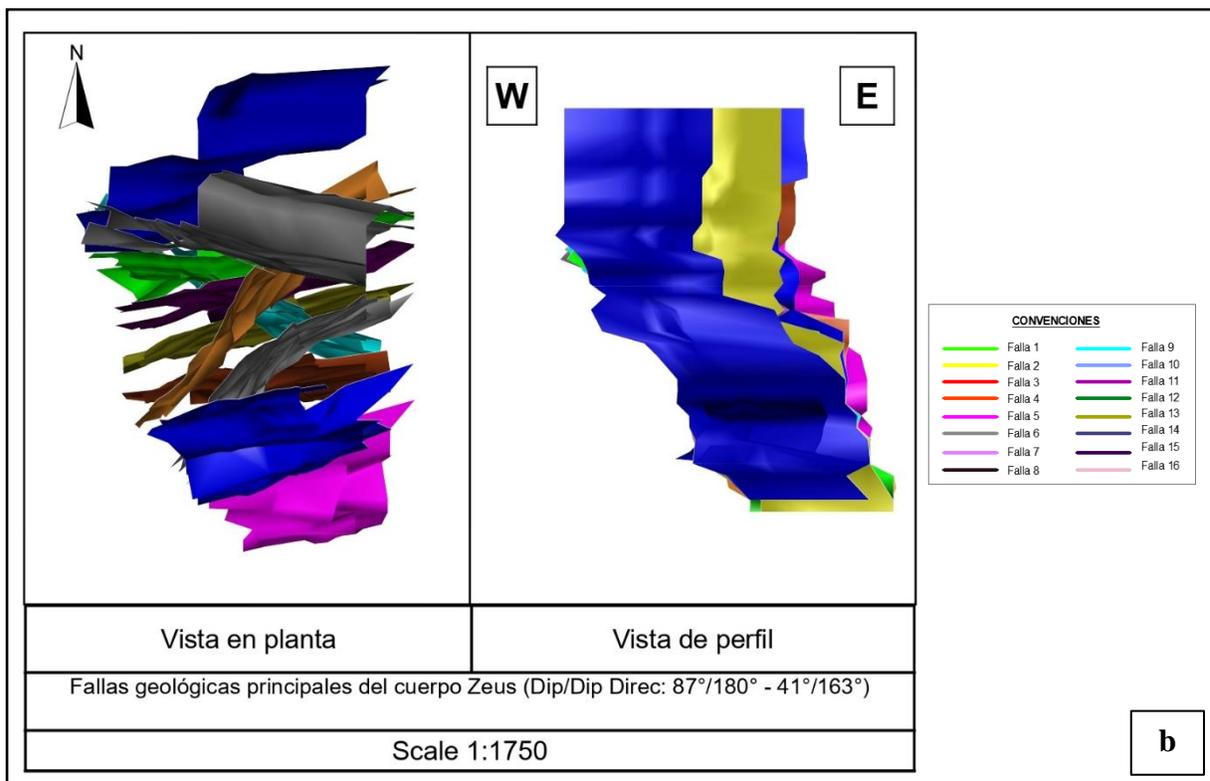
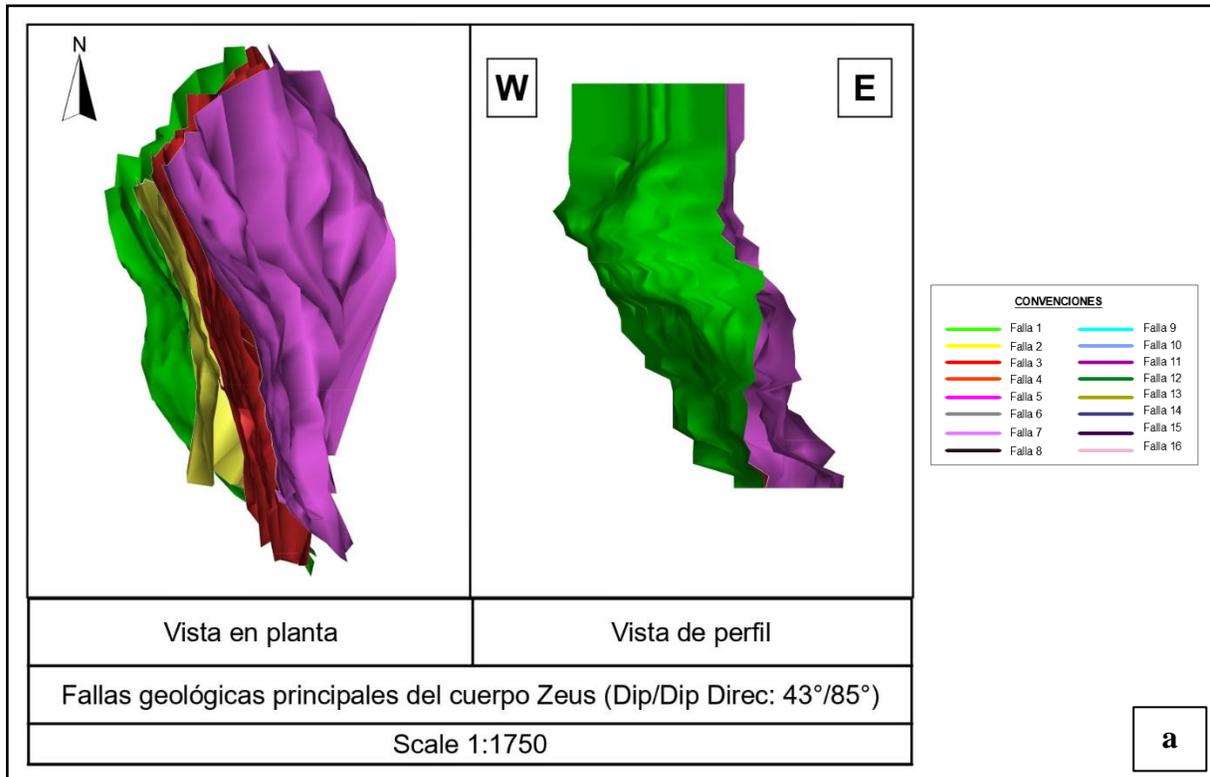


Figura 31. Vista en planta y perfil del modelo estructural del cuerpo Zeus (Escala 1:1750): a) Discontinuidades que siguen una tendencia 43°/85°. b) Discontinuidades que siguen una tendencia 87°/180°.

7.4. Tipo de depósito

El depósito de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) del proyecto El Roble (Figura 32) ocurre en rocas volcánicas máficas, predominantemente basaltos de afinidad toleítica (MORB) con estructuras almohadilladas y masivas, asociadas con rocas sedimentarias de poco espesor, por otro lado, la mineralización presenta altas concentraciones de Cu y Au y bajas concentraciones de Zn y Pb. Así, estas características han permitido clasificar el depósito (VMS) como tipo máfico según la clasificación de Franklin et al. (2005), o tipo Chipre utilizando la clasificación antigua pero aún muy utilizada de Sawkins (1976 en Ortiz, 1988 y Kelly, 2021).

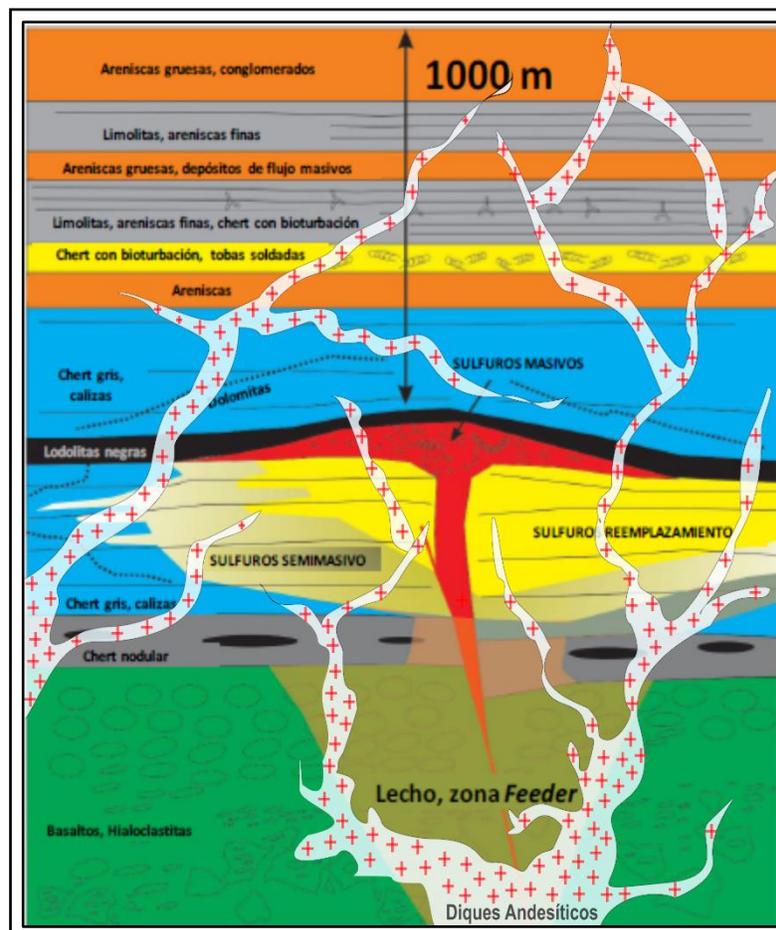


Figura 32: Modelo idealizado del depósito de sulfuros masivos volcanogénicos, Proyecto El Roble (Tomado y modificado de Espinal, 2020).

7.5. Geología económica

En la mina El Roble, los minerales de mena principales son la calcopirita que se encuentra rellenando espacios intergranulares de pirita, pirrotina, magnetita, esfalerita y el oro que se presenta como *electrum* en granos irregulares (10-100 micras). Entre los minerales de ganga se tiene cuarzo, clorita, calcita, dolomita, hematita y magnetita. Es preciso señalar que el 94% de los recursos medidos e indicados de la mina El Roble se encuentran en dos cuerpos principales: Zeus (86%) y Maximus (8%), el 6% restante se distribuye en cuatro cuerpos adicionales (Kelly, 2021).

Tabla 4: Recursos minerales Proyecto El Roble, reportados a septiembre 30 de 2020. Adaptado de Kelly, (2021).

Category	Tonnes (000)	Cu Eq. (%)	Cu (%)	Au (g/t)	Contained Metal	
					Cu Lbs (000)	Au oz (000)
Measured	1,039.2	4.34	3.31	2.29	75,745.7	76.5
Indicated	135.2	4.06	2.89	2.62	8,597.7	11.4
Measured + Indicated	1,174.4	4.30	3.26	2.33	84,343.3	87.9

8. Resultados

8.1. Análisis geomecánico del macizo rocoso

Durante la explotación minera se presentan múltiples problemas de inestabilidad del macizo rocoso, por lo tanto, se deben aplicar medidas que permitan contrarrestar estos escenarios, esto se logra conociendo las características y condiciones del macizo rocoso. Por consiguiente, se presentan las actividades que se ejecutaron para evaluar las propiedades geomecánicas del cuerpo actualmente explotado “Zeus”; estas actividades incluyen el mapeo geomecánico en labores subterráneas en explotación como procedimiento para clasificar el macizo rocoso, utilizando el sistema *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1989) y el sistema *Geological Strength Index* (GSI) de Hoek y Marinos (2000); esto permite que el tipo de sostenimiento a recomendar genere unas condiciones de trabajo optimas, asegurando la estabilidad del macizo rocoso.

8.1.1. Mapeo geomecánico

En la minería subterránea se recomienda recopilar información geomecánica del macizo rocoso desde el inicio de vida de un proyecto; asimismo, conforme avancen las labores subterráneas ir enriqueciendo la base de datos, a fin de cuantificar y verificar las condiciones del macizo rocoso, para ello, una de las técnicas más empleadas es el mapeo geomecánico. De este modo, la evaluación del macizo rocoso se realizó mediante estaciones geomecánicas a lo largo de los niveles en explotación, observando principalmente en el techo y los hastiales de las labores subterráneas las diferentes propiedades de las discontinuidades (Figura 33).

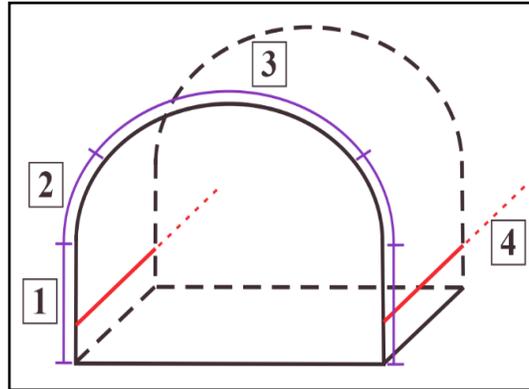


Figura 33. Partes de una labor subterránea: 1) Hastiales; 2) Bóvedas; 3) Corona o techo; y 4) Gradiente.

Cada estación abarcó un área aproximada de 3 m x 4.5 m (avance normal de una voladura por ancho estándar de una labor respectivamente); en esta se identificaron las principales familias de discontinuidades. Para cada familia se determinó: la orientación en formato azimutal y en *Dip/Dip Direction*, el *Rock Quality Designation* (RQD), el espaciamiento, la persistencia, la abertura, la rugosidad, el relleno, el grado de alteración, la presencia de agua y la resistencia a la compresión simple. Todo ello, para clasificar el macizo rocoso mediante el sistema RMR y GSI. Posteriormente, toda la información se representó utilizando el *software AutoCAD* en su plano correspondiente a cada nivel (Figura 34).

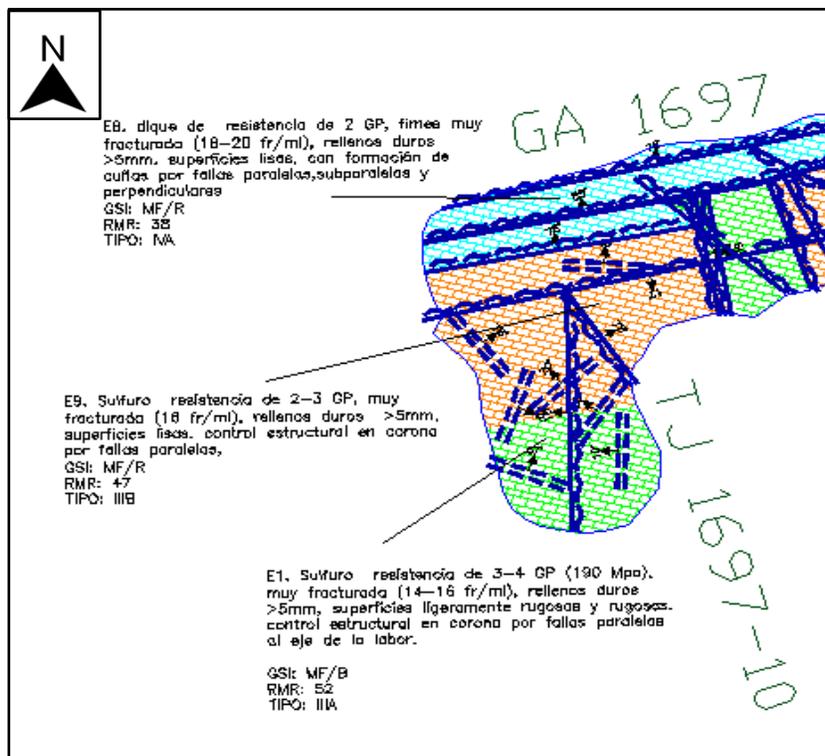


Figura 34. Ejemplo de mapeo geomecánico utilizando el *software AutoCAD* (Sin Escala). Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble.

8.1.2. Clasificación RMR de Bieniawski (1989)

Para efectos prácticos, en este trabajo se presenta la caracterización geomecánica correspondiente al nivel 1692 (NV_1692), donde se llevaron a cabo 55 caracterizaciones en un total de 49 estaciones geomecánicas (Tabla 5); es preciso mencionar que dichas estaciones se enumeran de tal forma que su reconocimiento sea más fácil, no se presentan en el orden cronológico de explotación de las labores mineras (Figura 35).

Tabla 5. Caracterizaciones geomecánicas de cada litología realizadas en 49 estaciones geomecánicas.

Litología	Caracterizaciones geomecánicas	Litología	Caracterizaciones geomecánicas
Basalto	5	Chert negro	15
Sulfuro	28	Diques	7
Total		55	

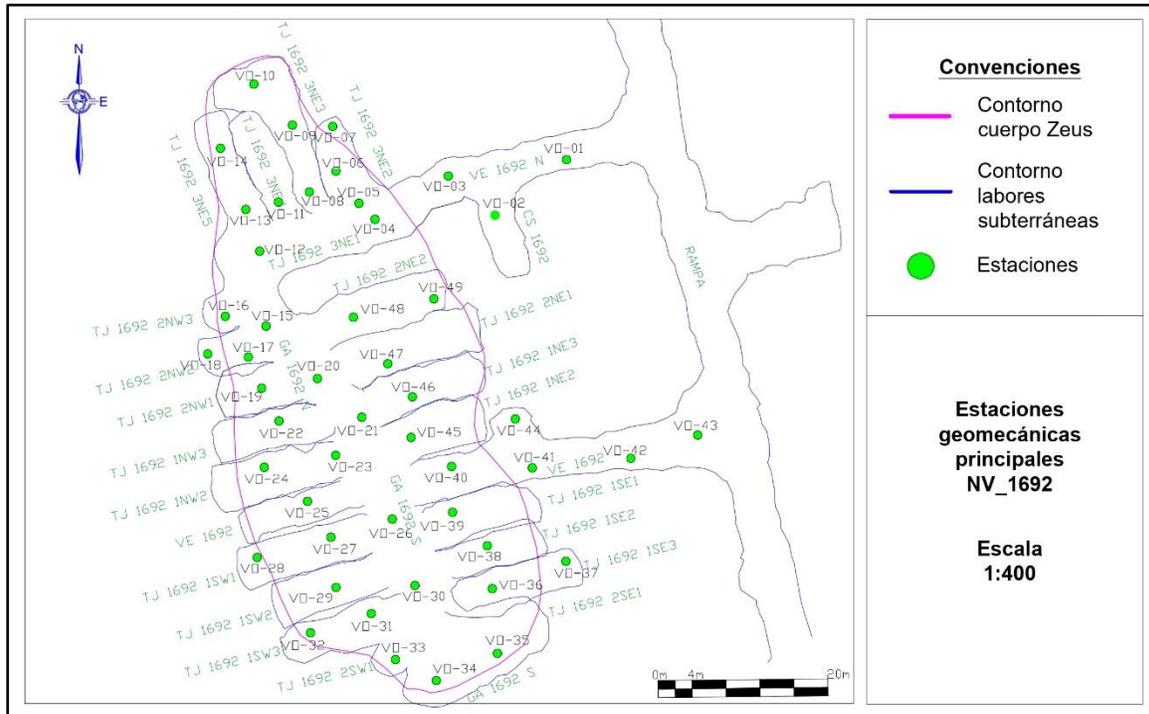


Figura 35. Estaciones geomecánicas nivel 1692 (Escala 1:400).

Estas estaciones permitieron describir numéricamente la calidad del macizo rocoso en función de la siguiente serie de parámetros a los que se les asignó cierto valor según sus características:

8.1.2.1. Litología

La litología, aunque no recibe valoración dentro de los parámetros requeridos en la clasificación RMR de Bieniawski (1989), su reconocimiento permite realizar una estimación de sus propiedades estructurales, físicas y de resistencia. De acuerdo a las litologías mencionadas en el capítulo 7 (Figura 20), en el nivel 1692 se reconoce: sulfuro masivo y semimasivo (ms) de grano fino donde predomina la piritita y calcopiritita y en menor proporción magnetita y pirrotina, además, continuos rellenos de calcita y/o cuarzo; el sulfuro está limitado por chert negro estratificado (Kbc) generalmente de calidad más baja; hacia el este de la sección se encuentra el basalto (Kv) de buena calidad; finalmente intruyendo toda la sección están los diques andesíticos (Tad) de calidad muy variable y espesores que van de centímetros a metros.

Debido a la existencia de los cuatro tipos de litologías, y a que se cuenta con valores representativos de cada litología, se presentará los datos y análisis por separado.

8.1.2.2. Resistencia a la compresión simple o uniaxial

Es uno de los parámetros de mayor relevancia, conocer que tan resistente y/o deformable es la roca puede condicionar el método de minado e inclusive la operación misma. Se puede determinar a través de elaborados ensayos de laboratorio o también directamente en campo realizando golpes con el martillo geológico o rebotes con martillo *Schmidt*. Por la dinámica del ciclo del minado, este parámetro se estimó a partir de golpes con martillo geológico soportados por la roca antes de romperse, categorizados desde R1 a R6 con los cuales se pudo establecer un rango en megapascales (MPa) de la resistencia, y a su vez obtener la puntuación o *rating* para el cálculo de RMR (Tabla 6).

Tabla 6. Resistencia a la compresión simple con su respectiva puntuación o *rating* para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Clase	Calificación de la roca según su resistencia	Estimación en campo de la resistencia	Resistencia a la compresión (MPa)	Puntaje o <i>Rating</i> (RMR)
R1	Muy Débil	La roca es deleznable con la punta del martillo geológico	1 - 5	1
R2	Débil	La roca indenta superficialmente con la punta del martillo geológico	5 - 25	2
R3	Moderadamente dura	La roca rompe con un golpe firme (hasta dos) con el martillo geológico	25 - 50	4
R4	Dura	La roca rompe con más de un golpe (dos a tres) con el martillo geológico	50 - 100	7
R5	Muy Dura	La roca requiere varios golpes (cuatro o más) con el martillo geológico para romperse	100 - 250	12
R6	Extremadamente Dura	La roca solamente desprende esquirlas cuando se golpea con el martillo geológico	>250	15

De acuerdo a repetidas evaluaciones hechas en campo se ha podido estimar la variabilidad de la resistencia a la compresión simple de las diferentes litologías, estos resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resistencia a la compresión simple de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble. Nótese la variabilidad de las resistencias en una misma litología.

Litología	Calificación de la roca	Resistencia con martillo geológico	Resistencia a la compresión (MPa)	Puntaje o <i>Rating</i> (RMR)
Chert negro	Débil	1 golpe	5 - 25	2
	Moderadamente dura	1-2 golpes	25 - 50	4
Sulfuro	Moderadamente dura	2 golpes	25 - 50	4
	Dura	2-3 golpes	50 - 100	7
	Muy Dura	3-4 golpes	100 - 250	12
Basalto	Moderadamente dura	2 golpes	25 - 50	4
	Dura	2-3 golpes	50 - 100	7
Diques	Moderadamente dura	2 golpes	25 - 50	4
	Dura	2-3 golpes	50 - 100	7

8.1.2.3. Índice de calidad de roca – RQD

El índice de la calidad de roca RQD (Deere, 1964) permite estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso a partir de testigos de perforación diamantina. Sin embargo, durante el trabajo de campo no es posible aplicar esta técnica ya que no se cuenta con testigos de perforación. Dada esta limitación, en la mina El Roble se ha puesto en práctica un método alternativo para calcular el RQD a partir de la frecuencia lineal de discontinuidades. Este método consiste en contar el número de discontinuidades presentes en el macizo rocosos en un metro lineal en cada avance de una labor subterránea, preferentemente en el techo de la labor y/o en zonas donde el fracturamiento es más intenso. Esta relación de discontinuidades por metro lineal (Nº Fr/m) permite hacer una estimación rápida y preliminar de las condiciones del macizo rocoso; luego con apoyo de la Tabla 8 es posible obtener el valor porcentual del RQD y por consiguiente la puntuación o *rating* para el cálculo de RMR (Tabla 9).

Tabla 8. Relación entre RQD y frecuencia de fracturas por metro lineal. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Nº Fr/m	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
RQD (%)	91	88	84	81	77	74	70	66	63	59	55	52	48	44	40	37	33	29	26	22

Tabla 9. Rangos de RQD con su respectiva puntuación o *rating* para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

% RQD	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25
Puntaje o Rating (RMR)	20	17	13	8	3

El análisis de los valores de RQD se realizó para el chert negro, sulfuro, basalto y diques por separado con el fin de comparar el fracturamiento de cada litología. Así, se determinó que el valor del RQD varía entre 29% y 59% para el sulfuro, entre 22% y 48% para el chert negro, entre 22% y 59% para el basalto y entre 37% y 48% para los diques (Tabla 10).

Tabla 10. RQD de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.

Litología	Nº Fr/m	% RQD	Puntaje o Rating (RMR)	Litología	Nº Fr/m	% RQD	Puntaje o Rating (RMR)
Chert negro	17	48	8	Basalto	14	59	13
	20	37	8		15	55	13
	21	33	8		16	52	13
	22	29	8		17	48	8
	24	22	3		24	22	3
Sulfuro	14	59	13	Diques	17	48	8
	15	55	13		18	44	8
	16	52	13		19	40	8
	17	48	8		20	37	8
	18	44	8				
	20	37	8				
	22	29	8				

8.1.2.4. Espaciamiento de las discontinuidades

Es la distancia perpendicular (generalmente dada en metros) entre discontinuidades adyacentes de una misma familia; este parámetro condiciona el tamaño de los bloques de roca, pues a menor espaciado los bloques serán más pequeños, por el contrario, los bloques serán más grandes cuanto más espaciado tengan. La caracterización de este parámetro está ligada con la frecuencia lineal de las discontinuidades, ya que la manera más rápida y acertada de obtenerla es calculando el inverso de la frecuencia, por ende, el resultado debe ser afín con el RQD.

$$\text{Espaciamiento (m)} = \frac{1}{N^{\circ} Fr/m}$$

Con el espaciamiento obtenido, se procedió con la puntuación o *rating* para el cálculo de RMR según la Tabla 11.

Tabla 11. Rangos de espaciamiento con su respectiva puntuación o *rating* para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Espaciamiento (m)	>2	0.6 - 2	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06
Puntaje o Rating (RMR)	20	15	10	8	5

De acuerdo a lo observado en campo, se tiene que el espaciamiento de las discontinuidades oscila entre 0.04 – 0.06 m para el chert negro, entre 0.04 – 0.07 m para el basalto y entre 0.05 – 0.07 m para el sulfuro y diques entre 0.05 – 0.06 m (Tabla 12); por consiguiente, se puede considerar que los bloques de roca son generalmente de tamaño pequeño. Es válido mencionar lo anterior, pues permite tener un dictamen en términos de estabilidad del macizo rocoso, ya que, al existir bloques de pequeño tamaño, hace que el macizo sea más inestable; cabe aclarar que este dictamen no es definitivo, a partir de la condición que presente la discontinuidad la estabilidad puede aumentar considerablemente.

Tabla 12. Espaciamiento de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.

Litología	Nº Fr/m	Espaciamiento (m)	Puntaje o Rating (RMR)
Chert negro	17	0.06	5
	20 - 23	0.05	5
	>24	0.04	5
Sulfuro	14 - 15	0.07	8
	16	0.06	8
	17 - 22	0.05	5
Basalto	14 - 15	0.07	8
	16	0.06	8
	17	0.06	5
	>24	0.04	5
Diques	17 - 18	0.06	5
	19 - 20	0.05	5

8.1.2.5. Condición de las discontinuidades

Este parámetro considera los siguientes factores: persistencia, abertura, rugosidad, resistencia y alteración; para cada factor se estableció un valor numérico, a partir de una Tabla modificada y adaptada de los valores originales de Bieniawski (1989) por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (Tabla 13).

Tabla 13. Condición de las discontinuidades con su respectiva puntuación o *rating* para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Condición de las discontinuidades	Persistencia	Rango	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	>20 m
		Puntaje	6	4	2	1	0
	Abertura	Rango	Cerrada	<0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	>5 mm
		Puntaje	6	5	4	1	0
	Rugosidad	Rango	Muy rugosa	Rugosa	Lig. rugosa	Lisa	Espejo de falla
		Puntaje	6	5	3	1	0
	Relleno	Rango	Limpia	Duros <5 mm	Duros >5 mm	Suaves <5 mm	Suaves >5 mm
		Puntaje	6	4	2	1	0
	Alteración	Rango	Sana	Lig. alterada	Mod. alterada	Muy alterada	Descompuesta
		Puntaje	6	5	3	2	0

8.1.2.5.1. Persistencia

La persistencia en múltiples ocasiones no se puede determinar, debido a que esta puede tener una gran extensión; por ende, para la puntuación o *rating* para el cálculo de RMR se recurre al promedio de avance de una voladura en un frente en explotación, el cual es de 3 a 4 metros (Tabla 14). Además, este factor se constata con el mapeo geomecánico realizado, durante la actualización de los planos geomecánicos en superficie.

Tabla 14. Persistencia utilizada para el cálculo de RMR en las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.

Persistencia (m)	Puntaje o Rating (RMR)
3 - 10	2

8.1.2.5.2. Abertura

La abertura hace referencia a la separación que existe entre las paredes de una discontinuidad, esta se mide en milímetros; a pesar de que es evidente, determinar este factor puede tener cierto

grado de complejidad pues es muy variable dentro del mismo frente en explotación. Los rangos de abertura están entre los 0.1 mm y 5 mm para el chert negro, basalto, sulfuro y diques (Tabla 15).

Tabla 15. Rangos de abertura de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.

Litología	Abertura	Puntaje o Rating (RMR)
Chert negro	0.1 - 1 mm	4
	1 - 5 mm	1
Sulfuro	0.1 - 1 mm	4
	1 - 5 mm	1
Basalto	0.1 - 1 mm	4
	1 - 5 mm	1
Diques	0.1 - 1 mm	4
	1 - 5 mm	1

8.1.2.5.3. *Rugosidad*

La rugosidad indica que tan irregular u ondulada son las superficies de una discontinuidad, este factor tiene gran influencia en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, pues depende de esta el posible movimiento y dirección de cuñas y/o bloques. Se determina de manera visual, siguiendo un esquema de referencia adaptado por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble.

De acuerdo a lo observado en campo, se determinó que las rugosidades predominantes en las paredes de las discontinuidades presentan tres morfologías diferentes: superficies estriadas, superficies lisas y superficies ligeramente rugosas (Tabla 16); pero es común que la misma discontinuidad presente variaciones en las superficies, por ejemplo, una superficie lisa a ligeramente rugosa, en estos casos la puntuación para el cálculo de RMR se promedia a partir de los 2 valores involucrados.

Tabla 16. Rangos de rugosidad predominantes de las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.

Litología	Rugosidad	Puntaje o Rating (RMR)	Litología	Rugosidad	Puntaje o Rating (RMR)
Chert negro	Lig. rugosa	3	Sulfuro	Lig. rugosa	3
	Lisa a Lig. Rugosa	2		Lisa a Lig. Rugosa	2
	Lisa	1		Lisa	1
	Superficie estriada	0	Basalto	Lig. rugosa	3
Diques	Lig. rugosa	3		Lisa a Lig. Rugosa	2
	Lisa a Lig. Rugosa	2		Lisa	1

8.1.2.5.4. *Relleno*

El relleno corresponde al material existente dentro de una discontinuidad. Este factor en términos de estabilidad, puede generar tanto situaciones desfavorables o favorables al macizo rocoso; por lo tanto, en la descripción de este factor se incluyó el tipo de relleno y espesor del mismo, encontrándose que para las cuatro litologías predominan los rellenos suaves >5 mm y <5 mm de tipo arcilloso y rellenos duros >5 mm y <5 mm de tipo silíceo y/o carbonatado (Tabla 17). Durante la evaluación de este factor también es válido calcular el promedio entre dos valores, ya que es muy probable encontrar macizos rocosos con presencia de dos tipos de rellenos diferentes, por ejemplo, un chert negro con rellenos duros >5 mm y rellenos suaves <5 mm.

Tabla 17. Rellenos predominantes presentes en las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.

Litología	Relleno (mm)	Puntaje o Rating (RMR)
Chert negro, Sulfuro, Basalto y Diques	Duros <5	4
	Duros >5	2
	Suaves <5	1
	Suaves >5	0

8.1.2.5.5. Alteración

La alteración está relacionada con la modificación que sufre el macizo rocoso debido a la acción de procesos exógenos como la presencia de agua y/o fluidos hidrotermales. Este factor se estimó a partir de la observación directa, donde se evidenció principalmente cambios en los componentes mineralógicos que generan aumento en la resistencia del macizo rocoso, tal es el caso de la silicificación; pero en ocasiones tienen el efecto contrario, pues la resistencia del macizo rocoso disminuye significativamente, como ocurre con la argilitización. De acuerdo a lo observado en campo, se determinó la existencia de tres alteraciones diferentes, las cuales se relacionan en la Tabla 18.

Tabla 18. Alteración predominante en las diferentes litologías del depósito de la mina El Roble.

Litología	Alteración	Puntaje o Rating (RMR)
Chert negro	Lig. alterada	5
	Mod. alterada	3
	Muy alterada	2
Sulfuro	Lig. alterada	5
	Mod. alterada	3
Basalto	Lig. alterada	5
	Mod. alterada	3
	Muy alterada	2
Diques	Lig. alterada	5
	Mod. alterada	3

8.1.2.6. Agua subterránea

Este parámetro hace referencia a las filtraciones y/o flujos de agua que existen en una labor subterránea. En términos de estabilidad, la presencia de agua es desfavorable, actúa como lubricante en las superficies de las discontinuidades generando el deslizamiento de cuñas y/o bloques de roca. La cuantificación de este parámetro se realizó según la Tabla 19, en la que se describen los cinco tipos posibles: seco, húmedo, mojado, goteo y flujo, tomadas por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble de la clasificación de Bieniawski (1989).

Tabla 19. Rangos de presencia de agua subterránea con su respectiva puntuación o *rating* para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Agua subterránea	Seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo
Puntaje o <i>Rating</i> (RMR)	15	10	7	4	0

Según las evaluaciones de campo, la presencia de agua no es abundante, razón por la cual se consideró como de tipo húmedo (Tabla 20). Sin embargo, existen casos puntuales en donde el goteo es constante, e inclusive se llegó apreciar flujos de agua; estas situaciones son válidas mencionar, ya que necesitan atención especial en cuanto a elementos de sostenimiento refiere.

Tabla 20. Clasificación del agua subterránea utilizada para el cálculo de RMR.

Agua subterránea	Húmedo
Puntaje o <i>Rating</i> (RMR)	10

8.1.2.7. Índice RMR básico

Realizada la valoración de los cinco parámetros iniciales, se procedió a realizar la sumatoria de los mismos, de este modo, el resultado obtenido corresponde al índice de calidad RMR (*Rock Mass Rating*).

$$RMR \text{ básico} = \text{Resistencia a la compresión} + RQD + \dots + \text{Agua subterránea}$$

En el **anexo III – Formato de mapeo geomecánico y parámetros de clasificación geomecánica**, se presenta la forma de registro de todos los parámetros descritos hasta el momento e información adicional por parte del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble.

Para interpretar los valores de RMR se considera la clasificación de la Tabla 21, donde un RMR igual a cero (0) es un macizo rocoso de calidad muy mala y un RMR igual a cien (100) es un macizo rocoso de excelente calidad.

Tabla 21. Interpretación de los valores de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 51	50 - 41	40 - 31	30 - 21	20 - 0
Clase de macizo rocoso	I	II	III A	III B	IV A	IV B	V
Calidad	Excelente	Muy buena	Buena	Moderada	Regular	Mala	Muy mala

De acuerdo a los resultados obtenidos, en las diferentes estaciones las litologías presentes en la mina El Roble se pueden clasificar en: Sulfuro tipo III A y tipo III B, un macizo rocoso de calidad buena a moderada con RMR entre 57 y 42; Chert negro tipo IV A y IVB, un macizo rocoso de calidad regular a mala con RMR entre 40 y 27; Basalto tipo III B y IV A, un macizo de calidad moderada a regular con RMR entre 50 y 33; y Diques tipo III B y IV A, un macizo rocoso de calidad moderada a regular con RMR entre 45 y 39 (Ver anexo V).

8.1.2.8. Índice RMR corregido

Bieniawski (1989) sugiere emplear el criterio de ajuste por orientación de las discontinuidades principales respecto al sentido de la labor subterránea, para obtener un RMR corregido. Por ende, con el presente trabajo se propone desarrollar la corrección en mención, para ello es necesario tener presente algunas recomendaciones relacionadas con la orientación de las labores subterráneas (Bieniawski, 1989).

- Si la labor avanza perpendicular al sistema principal de discontinuidades (Figura 36a), y el buzamiento de estas es a favor del avance (Figura 36b), se considera que existe condiciones favorables.
- Si la labor avanza perpendicular al sistema principal de discontinuidades, y el buzamiento de estas es en contra del avance (Figura 36c), se considera que existe condiciones desfavorables.
- Si la labor avanza paralela al sistema principal de discontinuidades, independiente del buzamiento de las mismas (Figura 37), se considera que existe condiciones desfavorables.
- Para toda labor en donde el sistema de discontinuidades presente un buzamiento entre $0^\circ - 20^\circ$, independiente del rumbo, se considera que existe condiciones regulares.

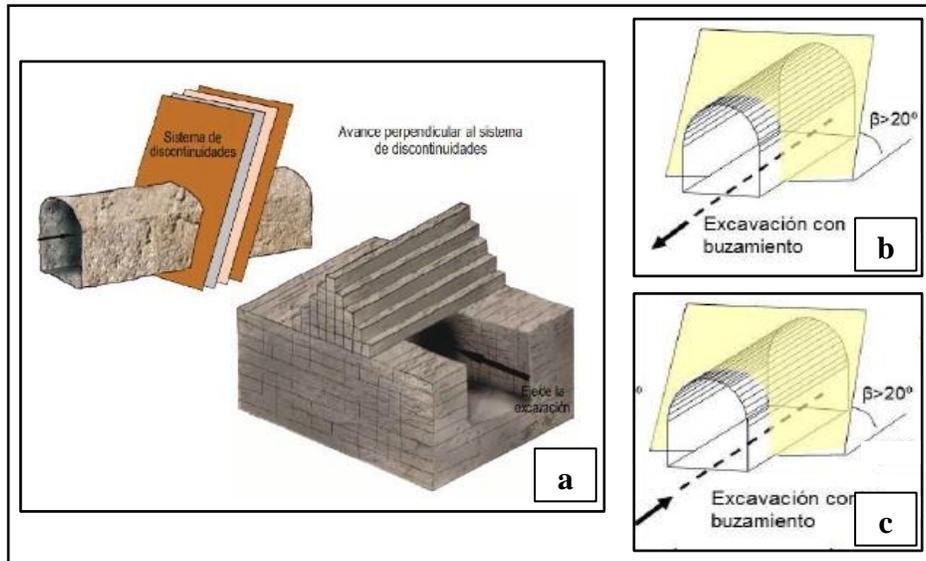


Figura 36. Orientación de las discontinuidades principales respecto al sentido de la labor subterránea: a) Avance perpendicular al sistema de discontinuidades; b) Buzamiento de la discontinuidad a favor del avance; c) Buzamiento de la discontinuidad en contra del avance. (Tomado y adaptado de Osinergmin, 2017; LOM, 2015).

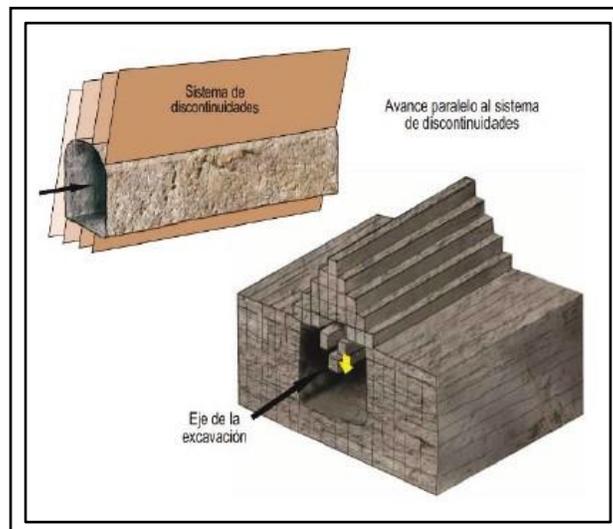


Figura 37. Orientación de las discontinuidades principales respecto al sentido de la labor subterránea: Avance paralelo al sistema de discontinuidades (Tomado y adaptado de Osinergmin, 2017).

Las recomendaciones señaladas también se aplican cuando existen cuñas (bloques de roca formados por la intersección de dos o más discontinuidades), donde independiente del buzamiento de las discontinuidades que las formen, se considera que existe condiciones desfavorables cuando la labor avanza paralela a la cuña, es decir cuando el avance es paralelo a la intersección de las discontinuidades; siendo lo más recomendable que la labor avance perpendicular al rumbo de la cuña (Figura 38).

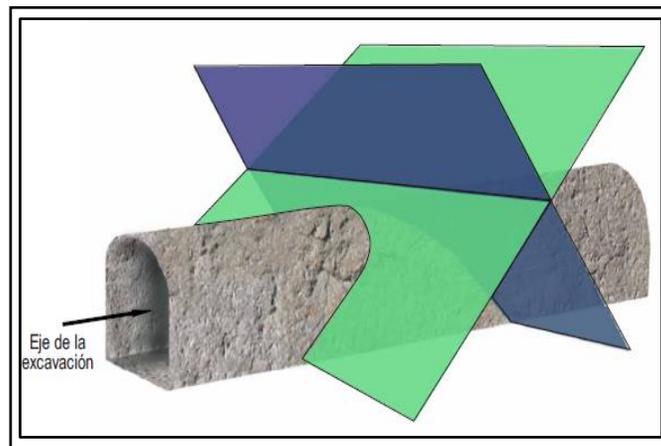


Figura 38. Orientación de las discontinuidades principales respecto al sentido de la labor subterránea: Avance perpendicular a la cuña (Tomado y adaptado de Osinergmin, 2017).

La valoración de este parámetro se presenta en la Figura 39, nótese que los puntajes o rating para el cálculo de RMR son negativos, esto se debe, a que el ajuste consiste en restar al RMR básico esta valoración.

$$RMR \text{ Corregido} = RMR \text{ Básico} - \text{Orientación de las discontinuidades}$$

	Rumbo perpendicular al eje del túnel				Rumbo paralelo al eje del túnel		Buzamiento 0° - 20° independiente del rumbo
	Avance con el buzamiento		Avance en contra del buzamiento				
	Buzamiento entre		Buzamiento entre		Buzamiento entre		
	45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° - 45°	
Condición	Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Regular
Puntaje o Rating	0	-2	-5	-10	-12	-5	-5

Figura 39. Condición de las discontinuidades con su respectiva puntuación o *rating* para el cálculo de RMR. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Como se ha mencionado, para realizar la corrección por la orientación de las discontinuidades, es preciso identificar el rumbo y buzamiento de las discontinuidades respecto a la labor subterránea. Para ello, el punto de partida fue el modelo estructural tridimensional que permitió observar a detalle la distribución estructural de las discontinuidades principales en el nivel 1692 (Ver Anexo II); el nivel se dividió en tres zonas (Figura 40), pues se identificó que el comportamiento de las discontinuidades varía de Norte a Sur. De este modo, se utilizó el *software DIPS* de *Rocscience*, para representar los datos estructurales mediante proyección estereográfica y obtener su distribución, a partir de la cual se consiguió, mediante análisis estadístico, mapas de contornos de densidad de polos y con estos los planos medios que corresponden a las direcciones medias de las discontinuidades o familias principales. Luego, se determinó como están dispuestas dichas discontinuidades respecto a las labores subterráneas las cuales tienen la orientación descrita en la Tabla 22. Finalmente, se utilizó el *software Unwedge* de *Rocscience*, para representar los planos de las familias de discontinuidades, y realizar un acercamiento a lo que es un análisis de formación y estabilidad de cuñas, que si bien, no afecta en la ponderación para la caracterización geomecánica, es un factor muy importante que influye en la estabilidad de una labor.

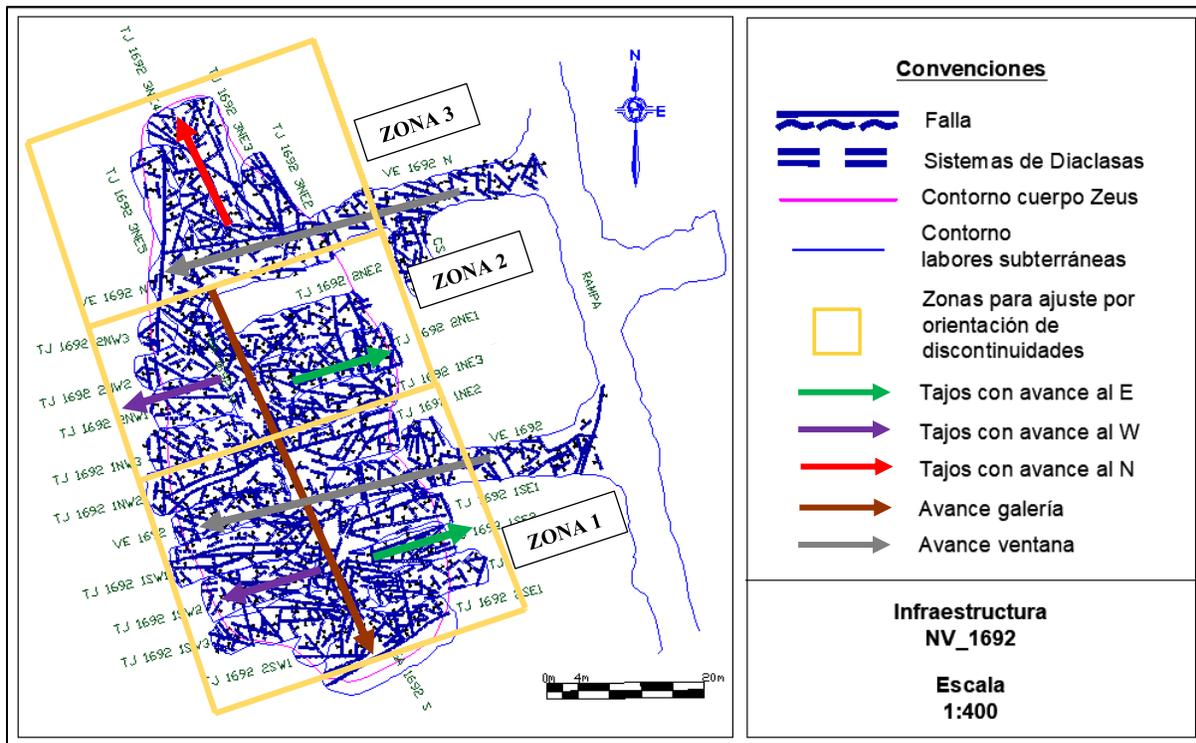


Figura 40. Infraestructura NV 1692 con zonas para ajuste por orientación de discontinuidades para el cálculo de RMR corregido.

Tabla 22. Orientación de las labores subterráneas del nivel 1692.

Labores subterráneas	Azimut
Tajos que avanzan hacia el E	70°
Tajos que avanzan hacia el W y ventanas	250°
Tajos que avanzan hacia el N	332°
Galería	152°

8.1.2.8.1. Zona 1

Para el análisis estadístico se utilizó un total de 197 datos estructurales (Anexo VI) tomados en la fase de campo, el cual arrojó los siguientes resultados:

- El diagrama de roseta (Figura 41a) y el diagrama de contornos de densidad de polos (Figura 41b) permite establecer la tendencia de las discontinuidades dadas por una familia de discontinuidades principal (FM1) que presenta un buzamiento medio 89° y una dirección de buzamiento media de 188° . Además, dos familias de discontinuidades secundarias: FM2 con un buzamiento medio 75° y una dirección de buzamiento media de 80° y FM3 que posee un buzamiento medio 60° y una dirección de buzamiento media de 145° .
- Se infiere que las familias de discontinuidades FM1 y FM3 corresponden a las discontinuidades que se localizan hacia el interior del nivel; mientras que la familia FM2 responde a zonas más específicas como lo son las discontinuidades presentes al final de las labores (contacto litológico) y las dispuestas sobre la galería principal.
- El estereograma (Figura 41c) representa los planos estructurales de estas familias de discontinuidades.

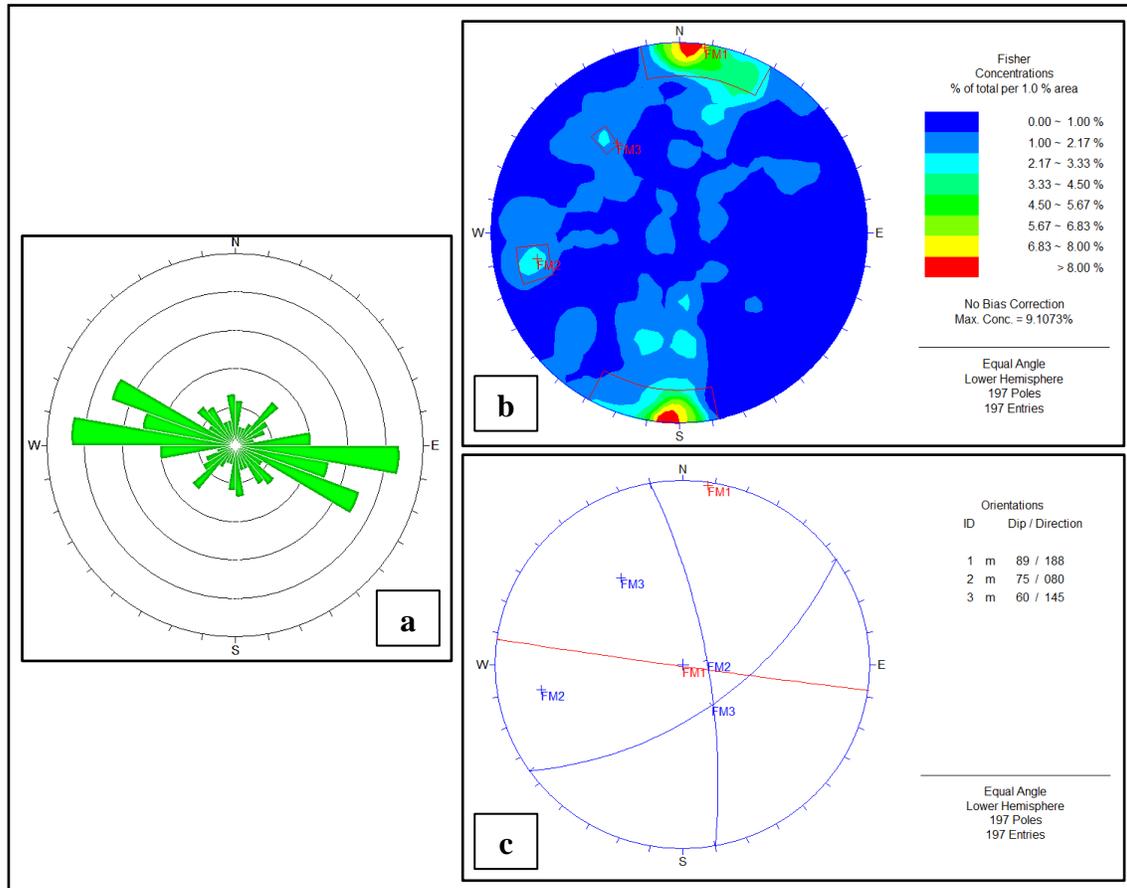


Figura 41. Análisis estadístico en el software Dips para la zona 1 –NV_1692: a) Diagrama de roseta. b) Diagrama de contornos, donde se marcan las áreas con mayor densidad de concentración de polos indicando las 3 familias de discontinuidades. c) Estereograma mostrando los planos principales de las 3 familias de discontinuidades.

La representación de las discontinuidades respecto a las labores subterráneas (Figura 42) sugieren que:

- El avance de los tajos con dirección hacia el Este tienden a ser perpendiculares a la familia de discontinuidades FM2 y oblicuos a las familias de discontinuidades FM1 y FM3, en los dos casos avanzan con el buzamiento ($>45^\circ$); para el caso donde el avance es oblicuo, la puntuación o rating para la corrección de RMR se procedió a realizar un promedio entre los valores de rumbo perpendicular al eje de la labor (avanzando con el buzamiento) y rumbo paralelo al eje

de la labor, ya que, no existe una categorización de este tipo en la clasificación de Bieniawski (1989) y es la que más se adapta al caso (Tabla 23).

- El avance de la ventana sur y los tajos con dirección hacia el W, están perpendicular a la familia de discontinuidades FM2, y oblicuos a las familias de discontinuidades FM1 y FM3, avanzando en los dos casos contrario al buzamiento ($>45^\circ$) de las discontinuidades (Tabla 24).
- El avance de la galería respecto a las familias de discontinuidades FM3 es perpendicular, a favor del buzamiento ($>45^\circ$); y tiende a ser oblicuo a las familias de discontinuidades FM1 y FM2, y avanza con el buzamiento, siendo necesario promediar la puntuación o rating para la corrección de RMR análogamente al caso de los tajos (Tabla 25).

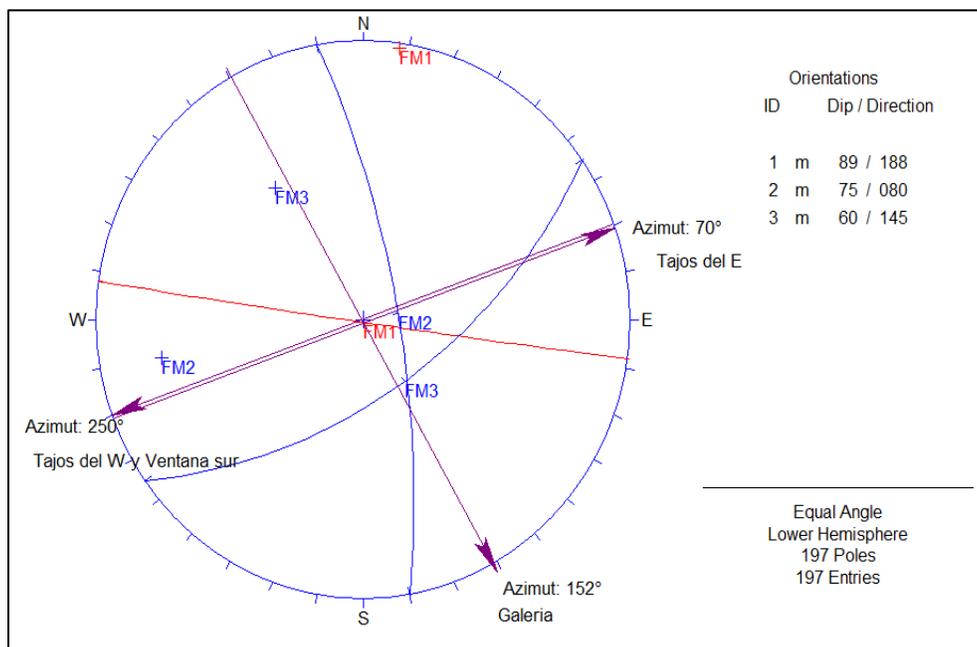


Figura 42. Representación estereográfica de las labores subterráneas respecto a las discontinuidades principales: zona 1.

Tabla 23. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el E de la zona 1.

Tajos con avance hacia el E respecto a				
FM1 y FM3	Rumbo perpendicular al eje de la labor	Rumbo paralelo al eje de la labor	FM2	Rumbo perpendicular al eje de la labor
	Avance con el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°		Avance con el buzamiento > 45°
Condición	Muy favorable	Muy desfavorable	Condición	Muy favorable
Puntaje	0	-12	Puntaje	0
Puntaje Promedio	-6		Puntaje	0

Tabla 24. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el W y ventana sur de la zona 1.

Tajos con avance hacia el W respecto a				
FM1 y FM3	Rumbo perpendicular al eje del túnel	Rumbo paralelo al eje del túnel	FM2	Rumbo perpendicular al eje del túnel
	Avance contra el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°		Avance contra el buzamiento > 45°
Condición	Regular	Muy desfavorable	Condición	Regular
Puntaje	-5	-12	Puntaje	-5
Puntaje Promedio	-8.5		Puntaje	-5

Tabla 25. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para la galería de la zona 1.

Galería respecto a				
FM1 y FM2	Rumbo perpendicular al eje de la labor	Rumbo paralelo al eje de la labor	FM3	Rumbo perpendicular al eje de la labor
	Avance con el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°		Avance con el buzamiento > 45°
Condición	Muy favorable	Muy desfavorable	Condición	Muy favorable
Puntaje	0	-12	Puntaje	0
Puntaje Promedio	-6		Puntaje	0

El análisis de cuñas permitió identificar las condiciones de favorabilidad de las mismas, encontrando que: los tajos con orientación hacia el E, avanzan perpendicular a las cuñas y con el buzamiento a favor (Figura 43), indicando condiciones favorables; los tajos con orientación hacia el W (incluida la ventana sur), avanzan paralelamente a las cuñas y con el buzamiento en contra (Figura 44), indicando condiciones desfavorables; y para la galería, esta avanza paralelamente a las cuñas, y con el buzamiento de las mismas (Figura 45), generando condiciones desfavorables.

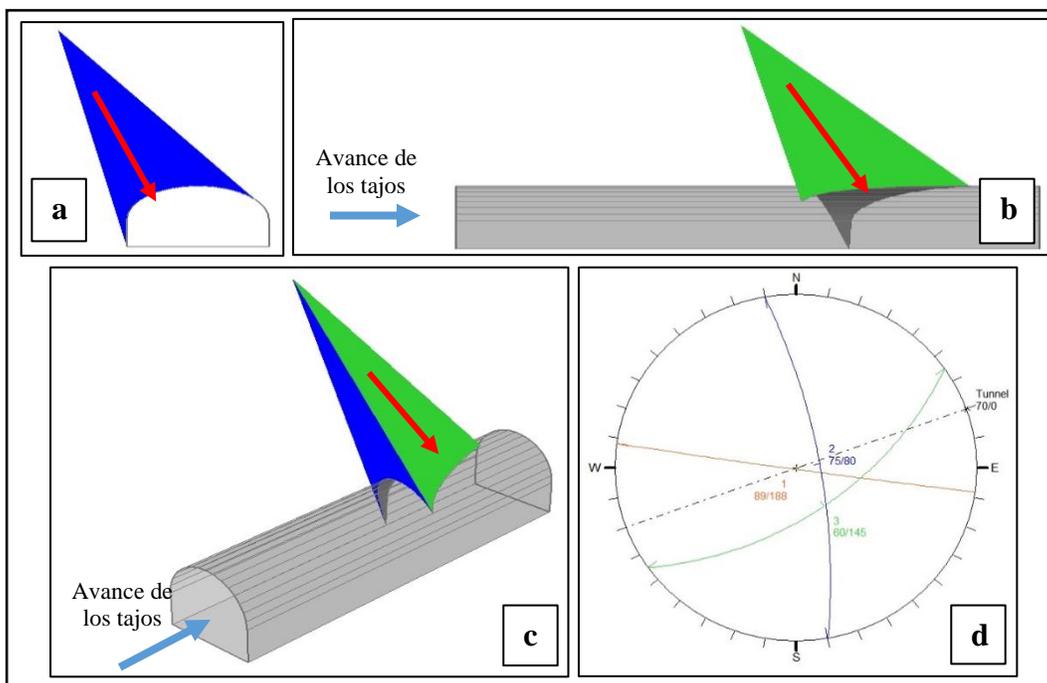


Figura 43. Análisis de cuñas en tajos que avanzan hacia el E (azimut= 70°) de la zona 1: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.

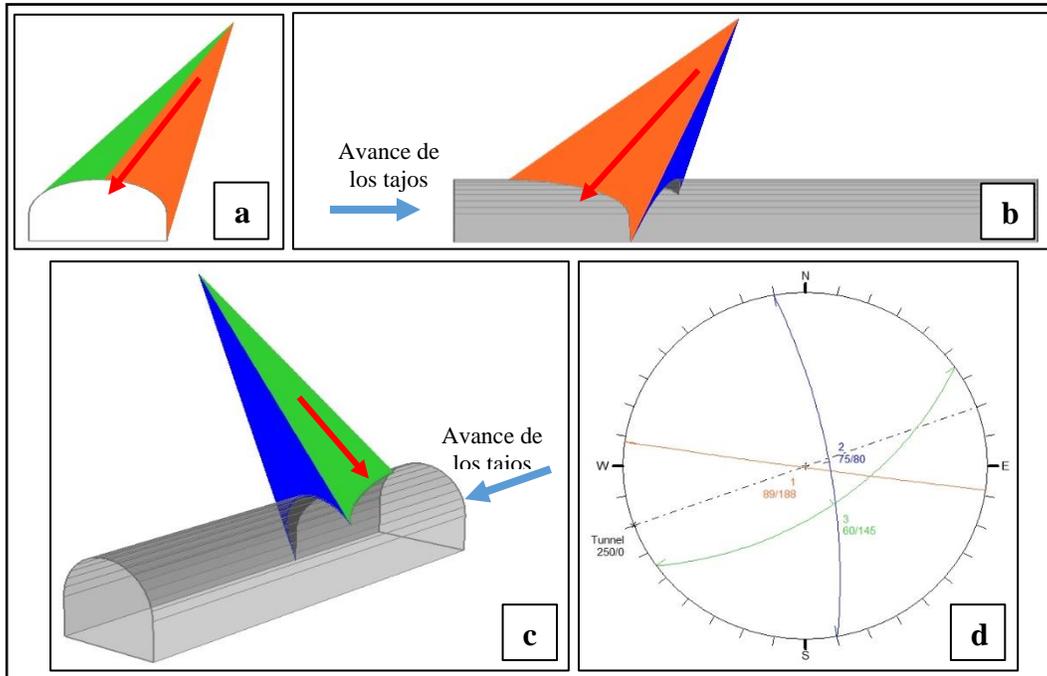


Figura 44. Análisis de cuñas en tajos y ventana sur que avanzan hacia el W (azimut= 250°) de la zona 1: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.

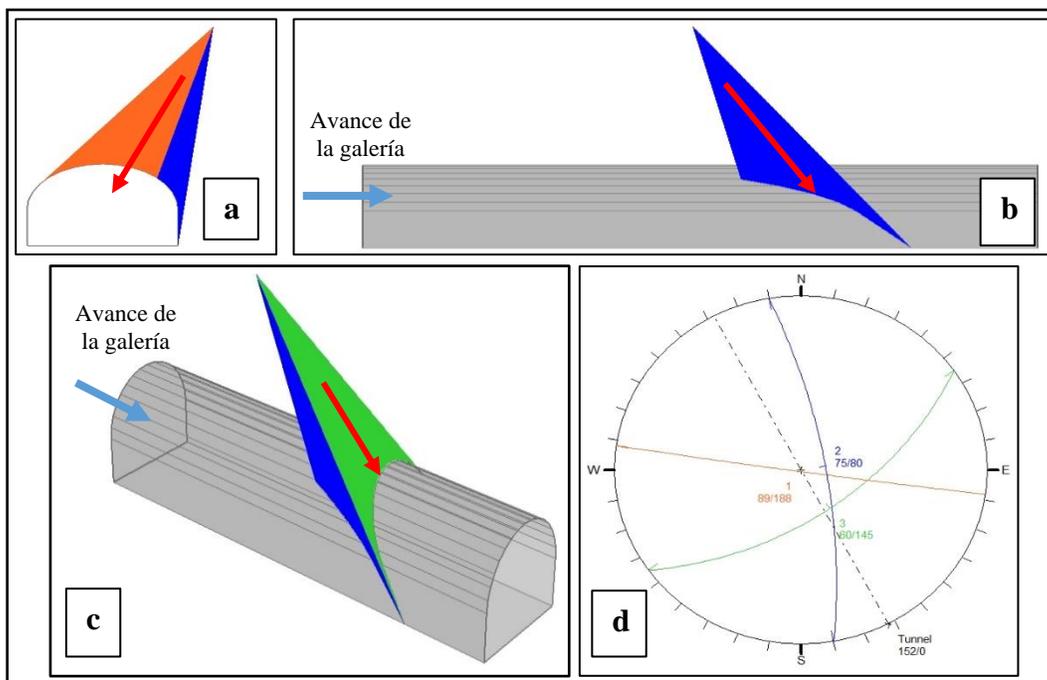


Figura 45. Análisis de cuñas en galería (azimut= 152°) de la zona 1: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de la galería.

8.1.2.8.2. Zona 2

Se tomaron en campo un total de 156 datos estructurales (Anexo VI) para el análisis estadístico, donde se encontraron los siguientes resultados:

- El diagrama de contornos de densidad de polos (Figura 46b) y el diagrama de roseta (Figura 46a) permite establecer la tendencia de las discontinuidades dadas por: una familia de discontinuidades principal (FM1) que presenta un buzamiento medio 89° y una dirección de buzamiento media de 2° . Además, dos familias de discontinuidades secundarias: FM2 con un buzamiento medio 62° y una dirección de buzamiento media de 217° y FM3 que posee un buzamiento medio 63° y una dirección de buzamiento media de 273° .
- Las familias de discontinuidades FM1 y FM2 corresponden a las discontinuidades que se localizan hacia el interior del nivel; mientras que las discontinuidades agrupadas como FM3 se corresponden a las discontinuidades presentes al final de las labores relacionadas a las zonas de contacto.
- El estereograma (Figura 46c) representa los planos estructurales de estas familias de discontinuidades.

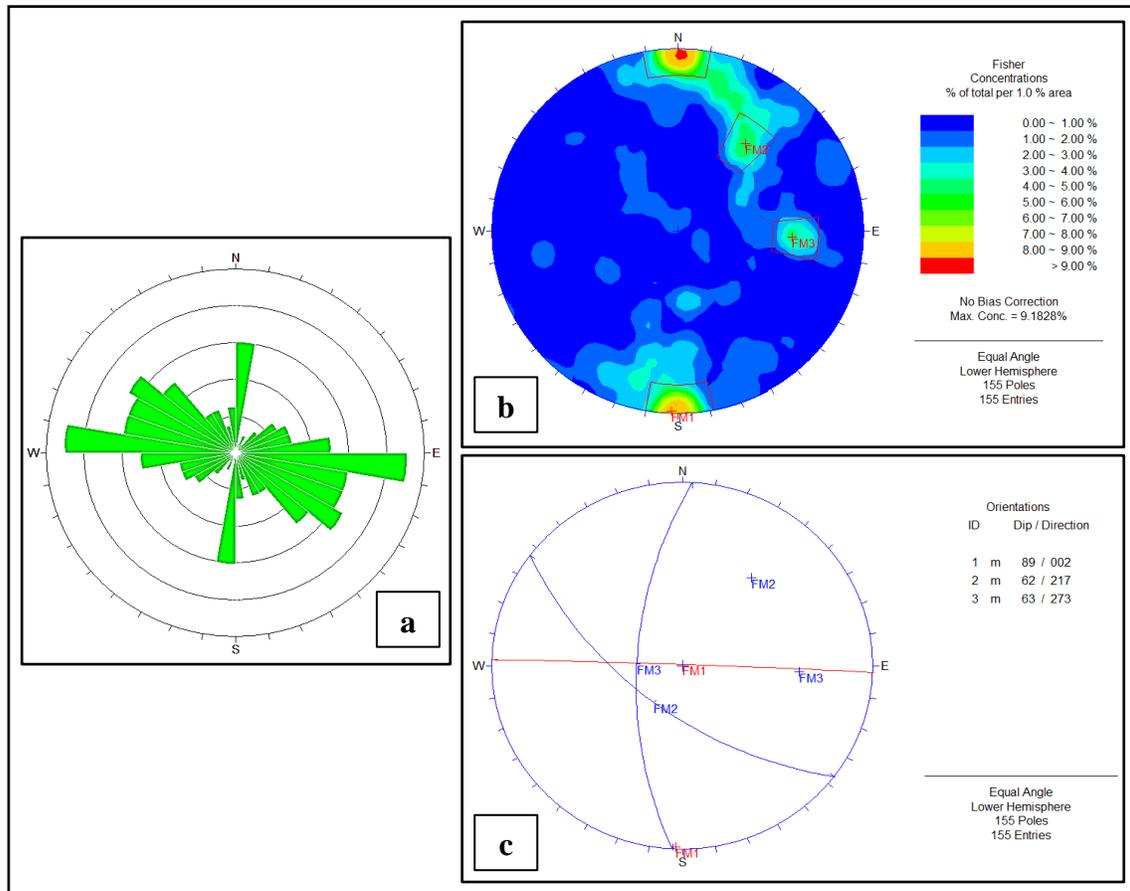


Figura 46. Análisis estadístico en el software Dips para la zona 2 –NV_1692: a) Diagrama de roseta, indicando las 3 tendencias principales de las discontinuidades. b) Diagrama de contornos, donde se marcan las áreas con mayor densidad de concentración de polos indicando las 3 familias de discontinuidades. c) Estereograma mostrando los planos principales de las 3 familias de discontinuidades.

De acuerdo al análisis estereográfico, el avance de las labores subterráneas respecto a las discontinuidades (Figura 47) se presenta así:

- El avance de los tajos con dirección hacia el W, es perpendicular a la familia de discontinuidades FM2, y su avance es con el buzamiento (>45°); respecto a las familias de discontinuidades FM1 y FM3, es oblicuo y avanzando en los dos casos con el buzamiento (>45°) de las discontinuidades (Tabla 26).

- Los avances de los tajos con dirección hacia el Este tienden a ser perpendiculares a la familia de discontinuidades FM2 y oblicuos a las familias de discontinuidades FM1 y FM3, en los tres casos avanzan contrario al buzamiento ($>45^\circ$) (Tabla 27).
- El avance de la galería respecto a las familias de discontinuidades FM1 es perpendicular, contrario al buzamiento ($>45^\circ$); y tiende a ser oblicuo a las familias de discontinuidades FM2 y FM3, que igualmente avanza contra del buzamiento ($>45^\circ$) (Tabla 28).

Es válido recordar que es necesario promediar la puntuación o rating para la corrección de RMR en los casos donde no es completamente perpendicular o paralelo el avance de la labor respecto a la discontinuidad.

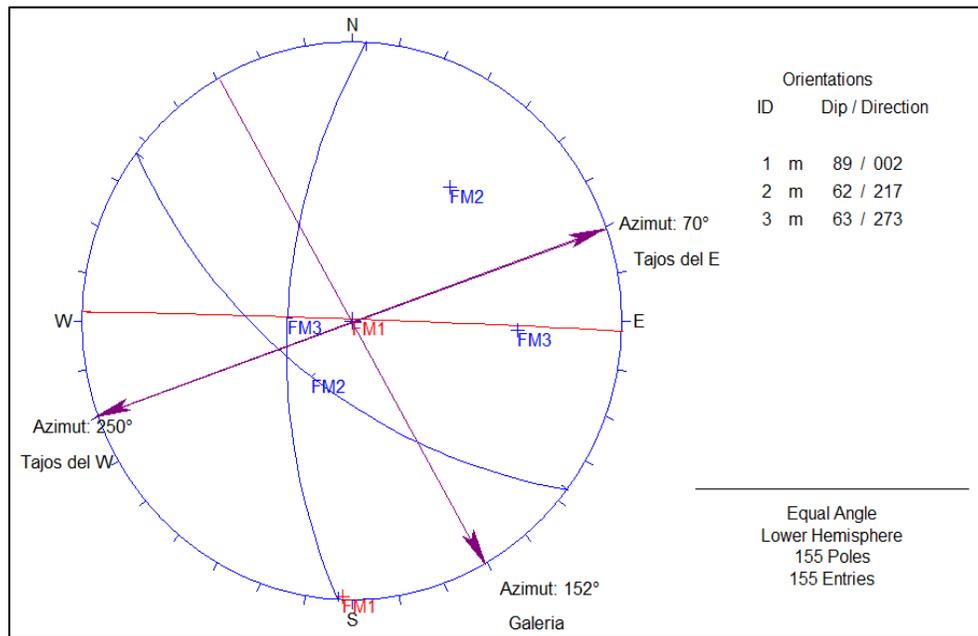


Figura 47. Representación estereográfica de las labores subterráneas respecto a las discontinuidades principales: zona 2.

Tabla 26. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el W de la zona 2.

Tajos con avance hacia el W respecto a				
FM1 y FM3	Rumbo perpendicular al eje del túnel	Rumbo paralelo al eje del túnel	FM2	Rumbo perpendicular al eje del túnel
	Avance con el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°		Avance con el buzamiento > 45°
Condición	Regular	Muy desfavorable	Condición	Muy favorable
Puntaje	-5	-12	Puntaje	0
Puntaje Promedio	-8.5			

Tabla 27. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para tajos con avance hacia el E de la zona 2.

Tajos con avance hacia el E respecto a				
FM1 y FM3	Rumbo perpendicular al eje del túnel	Rumbo paralelo al eje del túnel	FM2	Rumbo perpendicular al eje del túnel
	Avance contra el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°		Avance contra el buzamiento > 45°
Condición	Regular	Muy desfavorable	Condición	Regular
Puntaje	-5	-12	Puntaje	-5
Puntaje Promedio	-8.5			

Tabla 28. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para la galería de la zona 2.

Avance de galería respecto a				
FM2 y FM3	Rumbo perpendicular al eje del túnel	Rumbo paralelo al eje del túnel	FM1	Rumbo perpendicular al eje del túnel
	Avance contra el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°		Avance contra el buzamiento > 45°
Condición	Regular	Muy desfavorable	Condición	Regular
Puntaje	-5	-12	Puntaje	-5
Puntaje Promedio	-8.5			

El análisis de cuñas arrojó los siguientes resultados: los tajos con orientación hacia el E, avanzan con condiciones favorables, pues están perpendicular a las cuñas y con el buzamiento en contra (Figura 48); los tajos con orientación hacia el W, presentan condiciones desfavorables, avanzan paralelamente a las cuñas y con el buzamiento de las mismas (Figura 49); para la galería, esta avanza perpendicularmente a las cuñas, y contrario a su buzamiento (Figura 50), generando condiciones favorables.

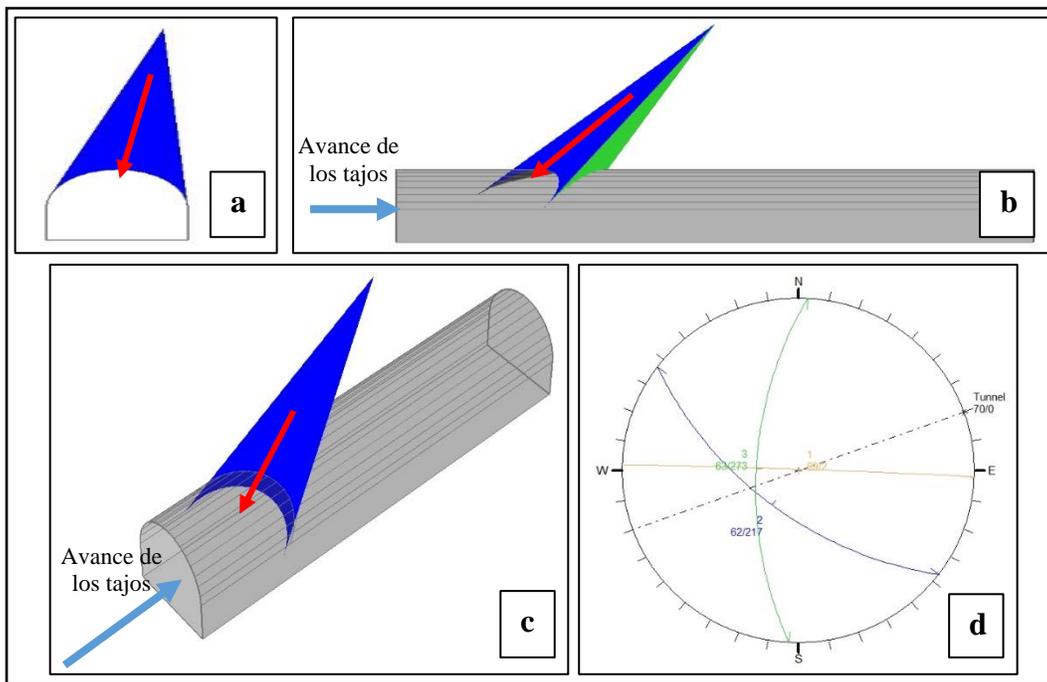


Figura 48. Análisis de cuñas en tajos que avanzan hacia el E (azimut= 70°). de la zona 2: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.

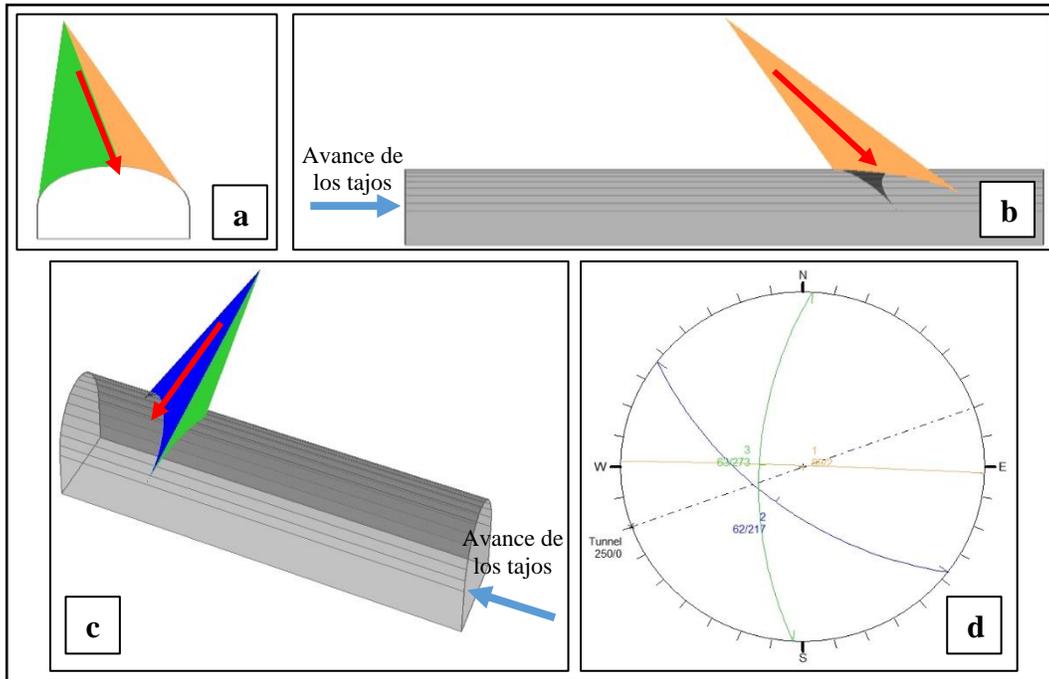


Figura 49. Análisis de cuñas en tajos que avanzan hacia el W (azimut= 250°) de la zona 2: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.

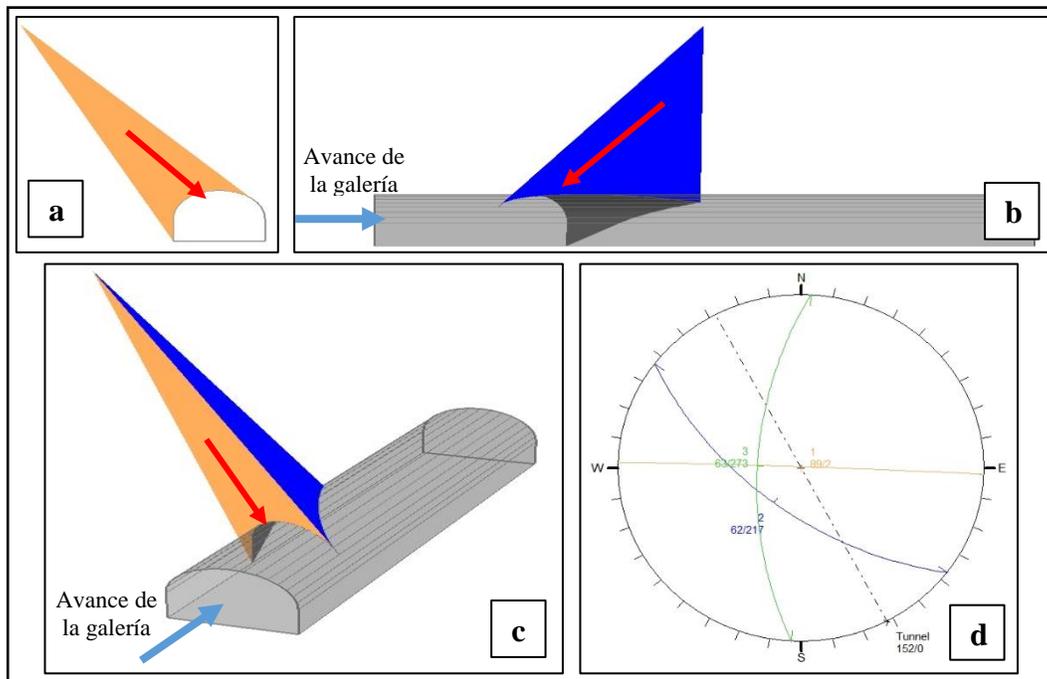


Figura 50. Análisis de cuñas en galería (azimut= 152°) de la zona 2: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos.

8.1.2.8.3. Zona 3

Los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico de 81 datos estructurales (Anexo VI) recolectados en campo se presentan a continuación:

- El diagrama de roseta (Figura 51a) y el diagrama de contornos de densidad de polos (Figura 51b) sugiere que las tendencias predominantes están dadas por una familia de discontinuidades principal (FM1) que presenta un buzamiento medio 89° y una dirección de buzamiento media de 183° . Conjuntamente, dos familias de discontinuidades secundarias: FM2 con un buzamiento medio 65° y una dirección de buzamiento media de 223° y FM3 que posee un buzamiento medio 44° y una dirección de buzamiento media de 267° .
- La familia de discontinuidades FM1 corresponde a las discontinuidades que se localizan más próximas a la ventana norte; las familias de discontinuidades FM2 y FM3 refieren hacia las discontinuidades que atraviesan por el interior y al borde (contacto litológico) de las labores restantes respectivamente.
- El estereograma (Figura 51c) representa los planos estructurales de estas familias de discontinuidades.

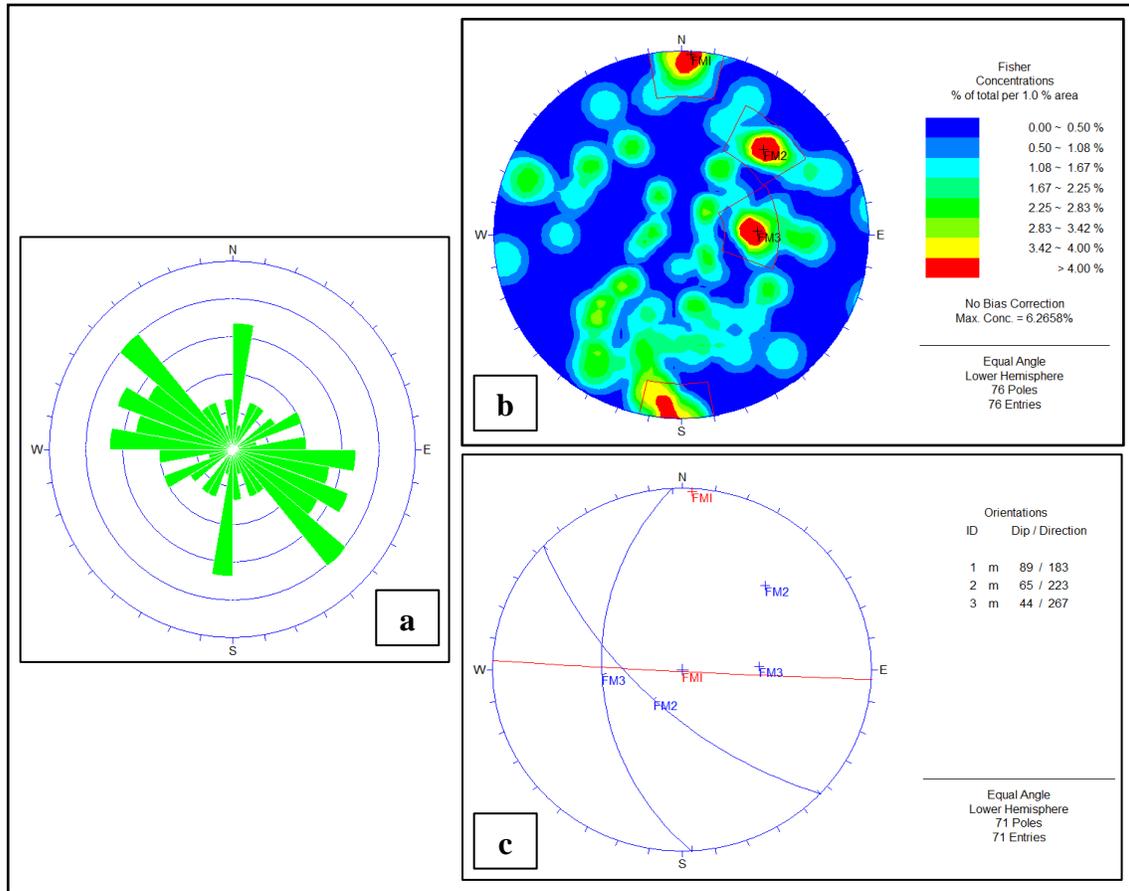


Figura 51. Análisis estadístico en el software Dips para la zona 3 – NV_1692: a) Diagrama de roseta. b) Diagrama de contornos, donde se marcan las áreas con mayor densidad de concentración de polos indicando las 3 familias de discontinuidades. c) Estereograma mostrando los planos principales de las 3 familias de discontinuidades.

Para la representación gráfica de las discontinuidades principales y las labores, se tuvo en cuenta los siguientes aspectos: al ser la zona más norte del nivel no cuenta con galería; los tajos existentes avanzan con un azimut de 332° ; y el acceso a estos tajos se realizó por la ventana norte que avanza con un azimut de 250° (Figura 52). También, como se presentó anteriormente, dentro de esta zona fue necesario promediar la puntuación o rating para la corrección de RMR en los casos donde no es completamente perpendicular o paralelo el avance de la labor respecto a la discontinuidad. De este modo, los resultados obtenidos fueron:

- El avance de la ventana norte respecto a la familia de discontinuidades FM1 tiende a ser oblicuo, y avanza con el buzamiento; esta misma labor avanza de manera perpendicular y con el buzamiento de las familias de discontinuidades FM2 y FM3 (Tabla 29).
- Los tajos avanzan: perpendicularmente y a favor del buzamiento de FM1; oblicuo y con el buzamiento de FM2 y paralelo a la familia de discontinuidades FM3 (Tabla 30).

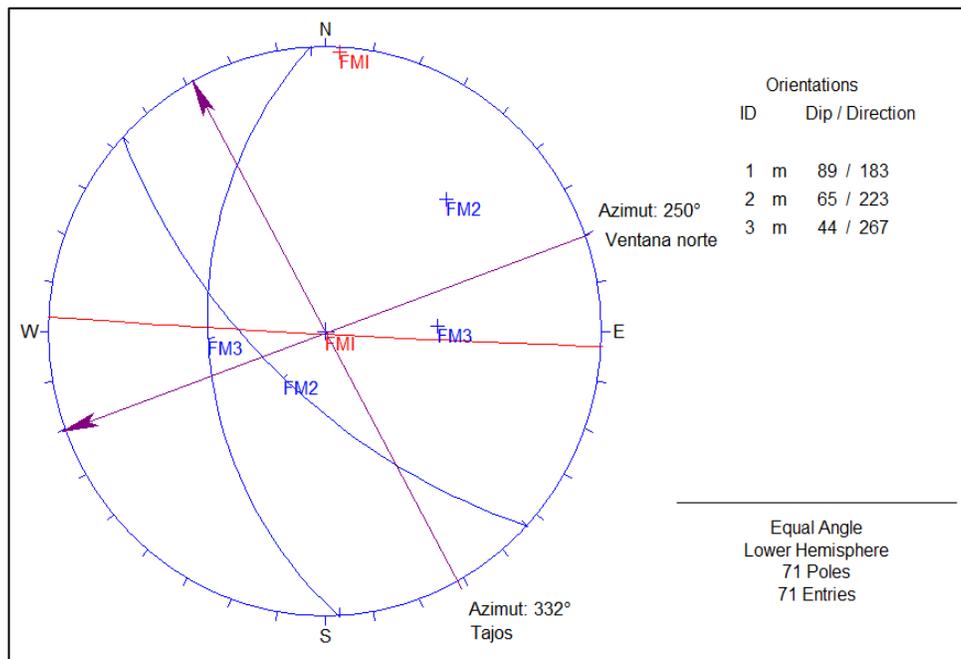


Figura 52. Representación estereográfica de las labores subterráneas respecto a las discontinuidades principales: zona 3.

Tabla 29. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para la ventana norte de la zona 3.

Avance de ventana norte respecto a				
FM1	Rumbo perpendicular al eje de la labor	Rumbo paralelo al eje de la labor	FM2 y FM3	Rumbo perpendicular al eje de la labor
	Avance con el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°		Avance con el buzamiento > 45°
Condición	Muy favorable	Muy desfavorable	Condición	Muy favorable
Puntaje	0	-12	Puntaje	0
Puntaje Promedio	-6			

Tabla 30. Puntuación utilizada para la corrección de RMR para los tajos de la zona 3.

Tajos con avance hacia el N respecto a				
FM1	Rumbo perpendicular al eje del túnel	FM3	Rumbo paralelo al eje del túnel	
	Avance con el buzamiento > 45°		Buzamiento > 45°	
Condición	Muy favorable	Condición	Muy desfavorable	
Puntaje	0	Puntaje	-12	
	FM2	Rumbo perpendicular al eje del túnel	Rumbo paralelo al eje del túnel	
		Avance con el buzamiento > 45°	Buzamiento > 45°	
	Condición	Muy favorable	Condición	Muy desfavorable
	Puntaje	0	Puntaje	-12
	Puntaje Promedio			-6

Los análisis de cuñas indican que los tajos de la zona 3, avanzan paralelamente a las cuñas y el buzamiento de estas es con el avance, indicando condiciones desfavorables (Figura 53); la ventana norte presenta condiciones favorables, pues el avance es perpendicular a las cuñas (Figura 54).

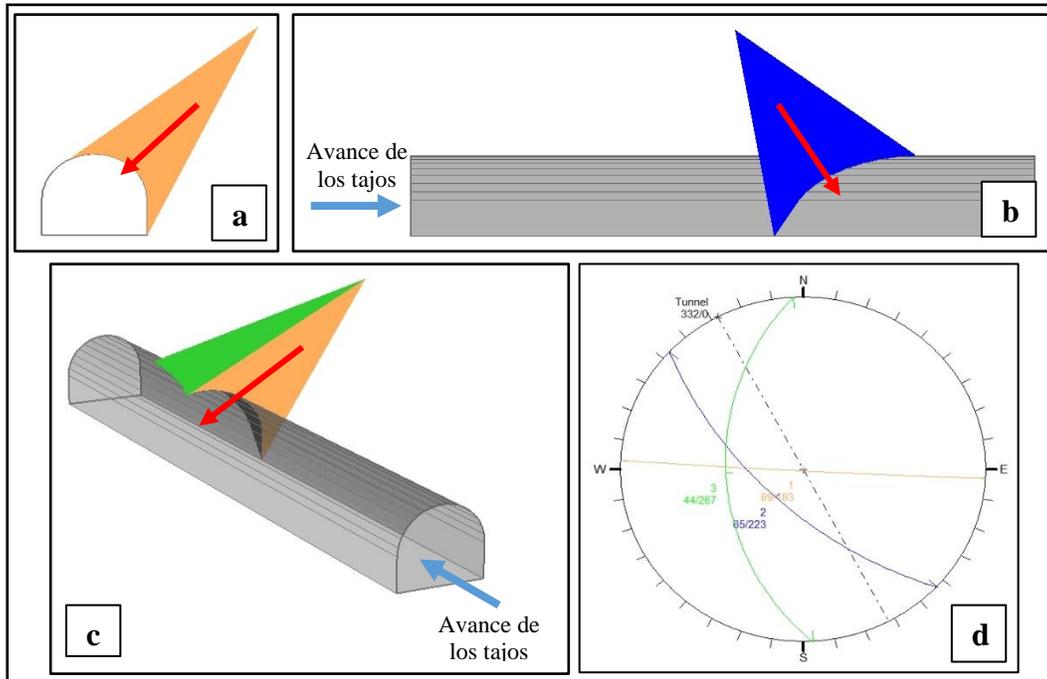


Figura 53. Análisis de cuñas en tajos de la zona 3: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de los tajos (azimut= 332°).

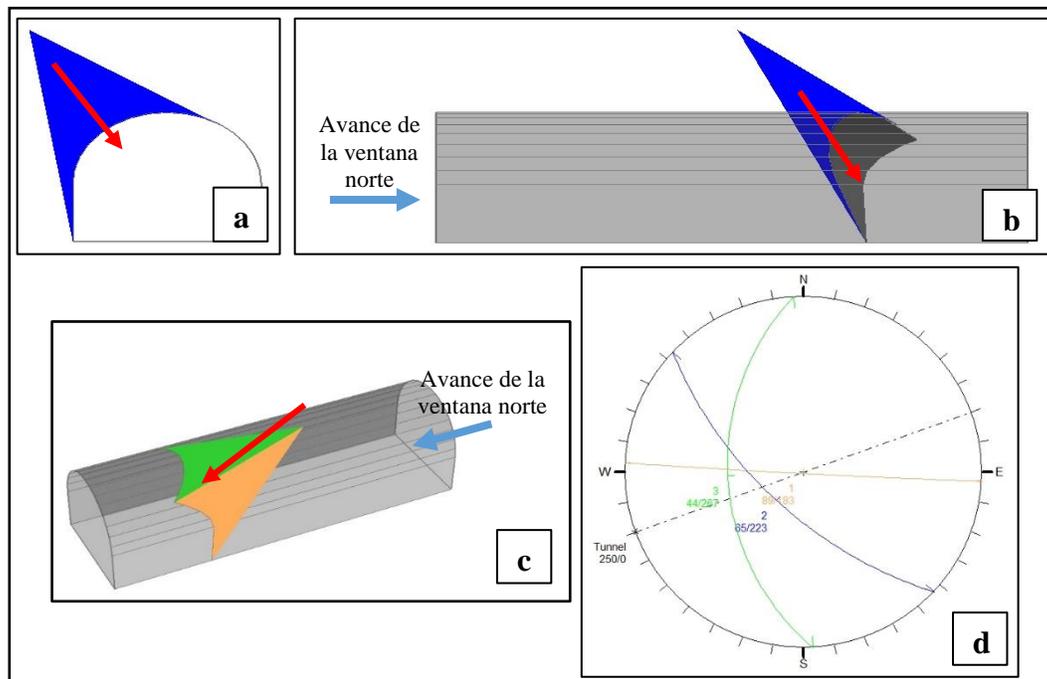


Figura 54. Análisis de cuñas en ventana norte de la zona 3: a) vista frontal; b) vista de perfil; c) vista tridimensional; d) estereograma indicando orientación de las familias de discontinuidades y de la ventana (azimut= 250°).

Finalmente, se ejecutó la corrección teniendo en cuenta las familias de discontinuidades predominantes en cada estación para ventanas, galería y tajos; logrando clasificar las litologías para cada zona del nivel 1692 de la siguiente manera (Ver Anexo V):

- Zona 1: Sulfuro tipo III A, donde el macizo rocoso es de buena calidad con RMR de 51; Sulfuro tipo III B, un macizo rocoso de calidad moderada, RMR entre 41 y 48.5; Chert negro tipo IV A, un macizo rocoso de calidad regular, RMR entre 32 y 37.5; Chert negro tipo IV B, un macizo rocoso de mala calidad, RMR entre 24 y 27; Basalto tipo III B, un macizo de calidad moderada, RMR igual a 45; Basalto tipo IV B, un macizo rocoso de mala calidad, RMR igual a 27; Dique tipo IV A, un macizo rocoso de calidad regular, RMR de 36 a 37.
- Zona 2: Sulfuro tipo III B, un macizo rocoso de calidad moderada con RMR entre 42.5 y 47.5; Sulfuro tipo IV A, un macizo rocoso de calidad regular, RMR igual a 39; Chert negro tipo IV A, un macizo rocoso de calidad regular, RMR de 31.5; Chert negro de tipo IV B, un macizo rocoso de mala calidad, con RMR de 26; y Diques tipo IV A, un macizo rocoso de calidad regular con RMR igual a 38.5.
- Zona 3: Sulfuro tipo III B, un macizo rocoso de calidad moderada con RMR entre 41.5 y 49; Sulfuro tipo IV A, un macizo rocoso de regular calidad con 39.5 de RMR; Chert negro tipo IV B, un macizo rocoso de calidad mala con RMR de 24 y 30; Basalto tipo III B, un macizo de calidad moderada con RMR igual a 43; Basalto tipo IV A, un macizo de calidad regular con RMR de 39; y Dique tipo IV B, un macizo rocoso de mala calidad con RMR igual a 27.

Tabla 31. Clasificaciones obtenidas para cada zona del nivel 1692.

Zona	Litología	Valor total RMR Corregido	Clase de macizo rocoso	Calidad
1	Sulfuro	41 - 48.5	III B	Moderada
		51	III A	Buena
	Kbc	32 - 37.5	IV A	Regular
		24 - 27	IV B	Mala
	Basalto	27	IV B	Mala
		45	III B	Moderada
Dique	36.5 - 37.5	IV A	Regular	
2	Sulfuro	39	IV A	Regular
		42.5 - 47.5	III B	Moderada
	Kbc	26	IV B	Mala
		31.5	IV A	Regular
Dique	35 - 38.5	IV A	Regular	
3	Sulfuro	39.5	IV A	Regular
		41.5 - 49	III B	Moderada
	Kbc	24 - 30	IV B	Mala
	Basalto	39	IV A	Regular
		43	III B	Moderada
Dique	27	IV B	Mala	

8.1.3. Clasificación GSI de Hoek y Marinos (2000)

El índice de resistencia geológica – GSI, es un sistema de clasificación que tiene gran aceptación en la minería subterránea, pues permite de manera ágil y sencilla caracterizar el macizo rocoso en función del fracturamiento y la condición. En la mina El Roble, esta clasificación tiene dos funciones muy importantes: la primera, ofrecer respaldo a la clasificación RMR; y la segunda, funcionar como guía para recomendar y dimensionar el sostenimiento a instalarse en una labor temporal o permanente según la calidad del macizo rocoso.

Para caracterizar el macizo rocoso según este sistema, se siguen los parámetros descritos en la Tabla 32 y 33.

Tabla 32. Grado de fracturamiento. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Nº Fr/m	% RQD	Clasificación
6 - 11	50 - 75	Fracturado (F)
12 - 20	25 - 50	Muy fracturado (MF)
> 20	0 - 25	Intensamente fracturado (IF)

Tabla 33. Condición de las discontinuidades. Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Condición	Características
Buena (B)	Superficies de las discontinuidades muy rugosas e inalteradas, fracturas cerradas. Se rompe con varios golpes de picota (más de 3 golpes). RC 100 a 250 MPa.
Regular (R)	Superficies de las discontinuidades rugosas, fracturas ligeramente abiertas (< 1 cm), rellenos duros. Levemente alterado con manchas de oxidación. Se rompe con 1 a 2 golpes de picota. RC 50 a 100 MPa.
Pobre (P)	Superficies de las discontinuidades lisas o con estrías, fracturas moderadamente abiertas (entre 1 a 5 cm). Roca con alteraciones. Arcillas moderadas. Rellenos deleznales. Se indenta superficialmente con golpes de picota, rompe máximo con un golpe. RC 25 a 50 MPa.
Muy pobre (MP)	Superficies de las discontinuidades pulidas o con estriaciones muy abiertas (>5 cm). Rellenos suaves y arcillosos. Muy alterado. Se indenta más de 5 cm. RC 5 a 25 MPa.

En el **anexo IV – Estándar de sostenimiento y clasificación GSI** se encuentran las Tablas GSI modificadas y adaptadas por parte del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble, donde se presentan los parámetros evaluados y su aplicación.

Según la clasificación GSI, el nivel 1692 presenta nueve tipos de macizos rocosos (Tabla 34):

1. MF/B: Muy fracturado, en buenas condiciones.
2. MF/R-B: Muy fracturado, en condiciones regulares a buenas.
3. MF/R: Muy fracturado, en condiciones regulares.
4. MF/R-P: Muy fracturado, en condiciones regulares a pobres.
5. MF/P: Muy fracturado, en condiciones pobres.
6. IF/R: Intensamente fracturado, en condiciones regulares.

7. IF/P: Intensamente fracturado, en condiciones pobres.
8. IF/P-MP: Intensamente fracturado, en condiciones pobres a muy pobres.
9. IF/MP: Intensamente fracturado, en condiciones muy pobres.

Tabla 34. Clasificación GSI para las litologías presentes en el nivel 1692 de la mina El Roble.

Zona	Litología	Valor total RMR Corregido	Clase de macizo rocoso	Clasificación GSI
1	Sulfuro	41 - 48.5	III B	MF/R
		51	III A	MF/B
	Kbc	32 - 37.5	IV A	MF/R-P
		24 - 27	IV B	IF/MP
	Basalto	27	IV B	IF/P
		45	III B	MF/R
Dique	36.5 - 37.5	IV A	MF/R	
2	Sulfuro	39	IV A	MF/R
		42.5 - 47.5	III B	MF/R
	Kbc	26	IV B	IF/P-MP
		31.5	IV A	MF/R-P
	Dique	35 - 38.5	IV A	MF/R
3	Sulfuro	39.5	IV A	IF/R
		41.5 - 49	III B	MF/R-B
	Kbc	24 - 30	IV B	IF/P
	Basalto	39	IV A	MF/R
		43	III B	MF/R
	Dique	27	IV B	MF/P

8.1.4. Zonificación geomecánica

La zonificación geomecánica establece zonas con comportamientos y calidades similares (Osinermin, 2017). Luego, en el anexo I, se presenta el mapa de zonificación geomecánica del nivel 1692, en el cual se muestra de manera sencilla las variaciones de las calidades del macizo rocoso descritas anteriormente. La elaboración de este mapa se realizó de acuerdo a los colores

propuestos en las tablas de estándar de sostenimiento y clasificación GSI del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (Figura 55).

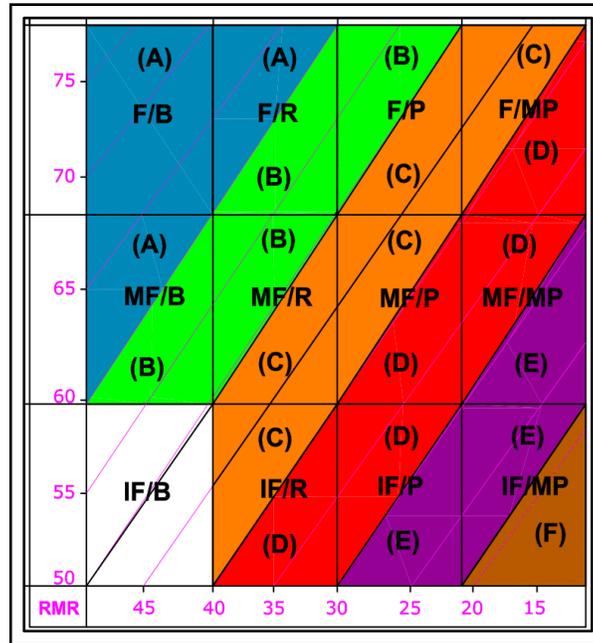


Figura 55. Colores utilizados para zonificación geomecánica nivel 1692 (Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017).

8.2. Recomendaciones de sostenimiento

Se sabe que el sostenimiento debe generar estabilidad al macizo rocoso durante toda la vida útil de una labor subterránea determinada, brindando seguridad para el personal y/o equipos; y que el tipo de sostenimiento a emplear dependerá de factores como el servicio que prestará la labor subterránea, costos de instalación (disponibilidad de equipos y elementos de sostenimiento) y por supuesto la calidad del macizo rocoso; y como se ha visto, para realizar la recomendación de sostenimiento, se sigue el estándar de sostenimiento de la mina El Roble, el cual dependiendo de la calidad del macizo rocoso en términos del sistema RMR de Bieniawski (1989) y el sistema GSI de Hoek y Marinos (2000), asigna un tipo de sostenimiento. Este estándar de sostenimiento permite que, el tipo de sostenimiento a recomendar sea obtenido utilizando la clasificación en términos del

sistema GSI, siguiendo unos rangos de RMR (Figura 54), ya que, en macizos rocosos de calidades muy heterogéneas como el nivel 1692 existen tramos con calidades que, si bien son diferentes, están dentro de un mismo rango, y por ende, tendrán el mismo tipo de sostenimiento. Lo anterior es importante, ya que la recomendación del sostenimiento para el nivel 1692, se realizó siguiendo dicha metodología (Tabla 35 y Tabla 36).

Por otro lado, hay que tener en cuenta dos aspectos muy importantes:

1. El estándar de sostenimiento se presenta de forma abreviada, de manera que la lectura se realiza de la siguiente manera:

- Para referirse al tipo de labor, específicamente en labores temporales: GA (galería) y TJ (tajos).
- Para referirse a elementos de sostenimiento: SS (*split set*), PH (perno helicoidal), M (malla electrosoldada), ENF (enfilajes) y SH (*shotcrete*), que puede ser tipo normal o reforzado (mayor cantidad de fibra sintética, que se ve reflejado en la alta resistencia y maleabilidad ante la deformación).
- Para referirse al lugar desde o hasta donde deben instalarse los elementos de sostenimiento: Gdt (gradiente) y Bóv (bóveda). Ver Figura 33. Partes de una labor subterránea.
- Para indicar la distancia a la que deben ser instalados los elementos de sostenimiento: @ 1.5 X 1.5m y/o @ 1.2 x 1.2m.

2. Existe el estándar de sostenimiento para labores temporales y para labores permanentes, donde los rangos se mantienen, pero los elementos de sostenimiento varían considerablemente.

Para representar de manera esquemática lo mencionado, se presenta en la Figura 56, como se obtuvo el sostenimiento para un tajo donde el macizo rocoso presenta dos calidades: un tramo es

sulfuro de calidad MF/R (muy fracturado en condiciones regulares) y RMR igual a 46; y en el tramo siguiente es un sulfuro de calidad MF/P (muy fracturado en condiciones pobres) con un RMR igual a 42. Para esto, primero se marca en la tabla de estándar de sostenimiento y clasificación GSI para labores temporales, las calidades de cada macizo rocoso (recuadro color violeta - MF/R; recuadro color azul - MF/P); luego, se señalan los valores de RMR de cada macizo rocoso para definir el tipo de sostenimiento (línea continua violeta: RMR=46; línea continua azul: RMR=42). Nótese que el sostenimiento para los dos tramos en mención será igual, de tipo C: SH2” + SS7’ @ 1.5 X 1.5 (Recuadro color verde).

MINA EL ROBLE SOSTENIMIENTO SEGUN G.S.I. (Modificado) LABORES MINERAS TEMPORALES (De 4.0 m a 6.0 m. Abertura)	
A	* M(Gdt) + PH8' @ 1.5 x 1.5 (Gdt) Segun Evaluación * SS7' @1.5 x 1.5 (Gdt) Segun Evaluación *Ga"/TJ
B	* SH2" + PH8' @1.5 x 1.5 (Gdt) * SH2" + SS7' @1.5 x 1.5 (Gdt) *Ga"/T
C	* SH2" + M(Gdt) + PH8' / SS7' @1.5 x 1.5 + SB/PRESOP @ 1.2 x 1.2 x 4m (Por Evaluación.) * SH2" + SS7' @1.5 X 1.5 (Boveda) *Ga"/T
D	* SH2" + M (Gdt) + PH8' / SS7' @1.2 x 1.2 + SH1" + SB/ENF @ 1.2 x 1.2 x 4m * SH2" + PH8' @ 1.5 x 1.5 (Boveda) *Ga"/TJ
E	* SH2" (Reforzado) + M(Gdt) + PH8' / SS7' @1.2 x 1.2 + SH2" + SB/PRESOP @ 1.2 x 1.2 x 4 m * SH2" + M (Boveda) + PH8' / SS7' @1.2 x 1.2 (Gdt) *Ga"/TJ
G	No se sugiere soporte por grado de criticidad (Colapso o Derrumbe)
Nota: Guia de Sostenimiento recomendado, siempre bajo supervisión y valoración por parte del área de Geomecánica.	
ESTRUCTURA	
FRACTURADO Muy bien trabada, no disturbada, bloques cubicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75%) 6 a 11 fracturas por metro	75 70
MUY FRACTURADO Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos o mas sistemas de discontinuidades (RQD 25 - 50%) (12 a 20 fracturas por metro)	65 60
INTENSAMENTE FRACTURADO Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques irregulares o angulosos. (RQD 0 - 25%) (más de 20 fracturas por metro)	55 50
	RMR
	CONDICIONES
	BUENA (muy resistente, fresca). Superficies de discontinuidades muy rugosas e inalteradas. Inclinación cerrada. Se rompe con varios golpes de picota (más de 3 golpes) (Rc 100 a 250 MPa)
	REGULAR (resistente, levemente alterado). Discontinuidades rugosas, ligeramente abiertas (menos a 1cm), relleno duro. Levemente alterado con picota. Se rompe con 1 a 2 golpes de picota (Rc 50 a 100 MPa)
	POBRE (Moder. alter). Discontinuidades lisas o con estrías, moderadamente abiertas (entre 1cm a 5cm). Roca con Alteraciones Acc. Se rellena deleznable. Se indenta superficialmente con golpes de picota (1 a 5mm) y a un máximo de 1CP (Rc 25 a 50 MPa).
	MUY POBRE (blanda, muy alterada). Discontinuidades pulidas o con estrías muy abiertas (mayor a 5cm). Relleno suave y arcillosos. Muy alterado. Se indenta más de 5 mm (Rc 5 a 25 MPa).
	RMR
	45 40 35 30 25 20 15

Figura 56. Ejemplo de aplicación de la metodología para obtener el tipo de sostenimiento para un tajo, de acuerdo al estándar de sostenimiento de la mina El Roble (Tomado y modificado de Departamento de geomecánica de la mina El Roble).

Tabla 35. Recomendaciones de sostenimiento para avances de labores temporales en el nivel 1692.

Labores subterráneas temporales				
Galería				
Litología	RMR	GSI	Sostenimiento	
			Tipo	Elementos
Sulfuro	60 - 51	MF/B	B	SH2" + PH8' @ 1.5 X 1.5m
	50 - 41	MF/R-B	C	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.5 X 1.5m
	40 - 31	MF/R	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m
IF/R				
Kbc	40 - 31	MF/R-P	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m
		MF/P		
		IF/P		
	30 - 21	IF/P	E	SH2" (Reforzado) + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m
		IF/P-MP		
IF/MP				
Dique	50 - 41	MF/R	C	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.5 X 1.5m
	40 - 31	MF/R	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m
		MF/P		
	30 - 21	MF/P	E	SH2" (Reforzado) + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m
Tajos				
Litología	RMR	GSI	Sostenimiento	
			Tipo	Elementos
Sulfuro	60 - 51	MF/B	B	SH2" + SS7' @ 1.5 X 1.5m
	50 - 41	MF/R-B	C	SH2" + SS7' (Bón) @ 1.5 X 1.5m
	40 - 31	MF/R	D	SH2" (Reforzado) + SS7' (Bón) @ 1.5 X 1.5m
IF/R				
Kbc	40 - 31	MF/R-P	D	SH2" (Reforzado) + SS7' (Bón) @ 1.5 X 1.5m
		MF/P		
		IF/P		
	30 - 21	IF/P	E	SH2" (Reforzado) + M + SS7' (Bón) @ 1.2 X 1.2m
		IF/P-MP		
IF/MP				
Dique	50 - 41	MF/R	C	SH2" + SS7' (Bón) @ 1.5 X 1.5m
	40 - 31	MF/R	D	SH2" (Reforzado) + SS7' (Bón) @ 1.5 X 1.5m
		MF/P		
30 - 21	MF/P	E	SH2" (Reforzado) + M + SS7' (Bón) @ 1.2 X 1.2m	

Tabla 36. Recomendaciones de sostenimiento para avances de labores permanentes en el nivel 1692.

Labores subterráneas permanentes					
Ventanas - Cámara de servicio					
Litología	RMR	GSI	Sostenimiento		
			Tipo	Elementos	
Kbc	40 - 31	MF/R-P	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla)	
		MF/P			
		IF/P			
	30 - 21	IF/P	E	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla) + ENF @ 1.0 X 1.0m	
		IF/P-MP			
		IF/MP			
Dique	50 - 41	MF/R	C	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.5 X 1.5m + SH1" (sobre malla)	
	40 - 31	MF/R	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla)	
		MF/P			
	30 - 21	MF/P	E	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla) + ENF @ 1.0 X 1.0m	
	Basalto	50 - 41	MF/R	C	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.5 X 1.5m + SH1" (sobre malla)
		40 - 31	MF/R	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla)
MF/P					
30 - 21		IF/P	E	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla) + ENF @ 1.0 X 1.0m	

9. Análisis de los resultados

9.1. Modelo estructural del cuerpo Zeus

El modelo estructural construido servirá como herramienta durante proceso de diseño de minado de nuevos frentes de explotación. Ya que, permite ser manipulado para visualizar la información de manera clara y sencilla.

El modelo estructural se basa en la diferenciación de las discontinuidades, que están directamente relacionadas con la continuidad de las mismas en rumbo y profundidad, las cuales están relativamente espaciadas y siguen una tendencia muy bien definida dada por las familias de discontinuidades FM1, FM3 y FM4. Por otro lado, el análisis estereográfico (Figura 57b) sugiere una segunda tendencia con afinidad a la familia de discontinuidades FM2, que se presume corresponde a las discontinuidades presentes hacia el interior del cuerpo, pues gráficamente no es posible visualizarlas. Los buzamientos medios y direcciones de buzamiento medias de estas familias se muestran en la Tabla 37 y se representan en la Figura 57c.

Tabla 37. Familias de discontinuidades principales y secundarias presentes en el cuerpo Zeus.

Discontinuidades principales	Orientación	
	<i>Dip</i>	<i>Dip Direction</i>
FM1	87°	180°
FM2	42°	248°
FM3	41°	163°
FM4	43°	85°

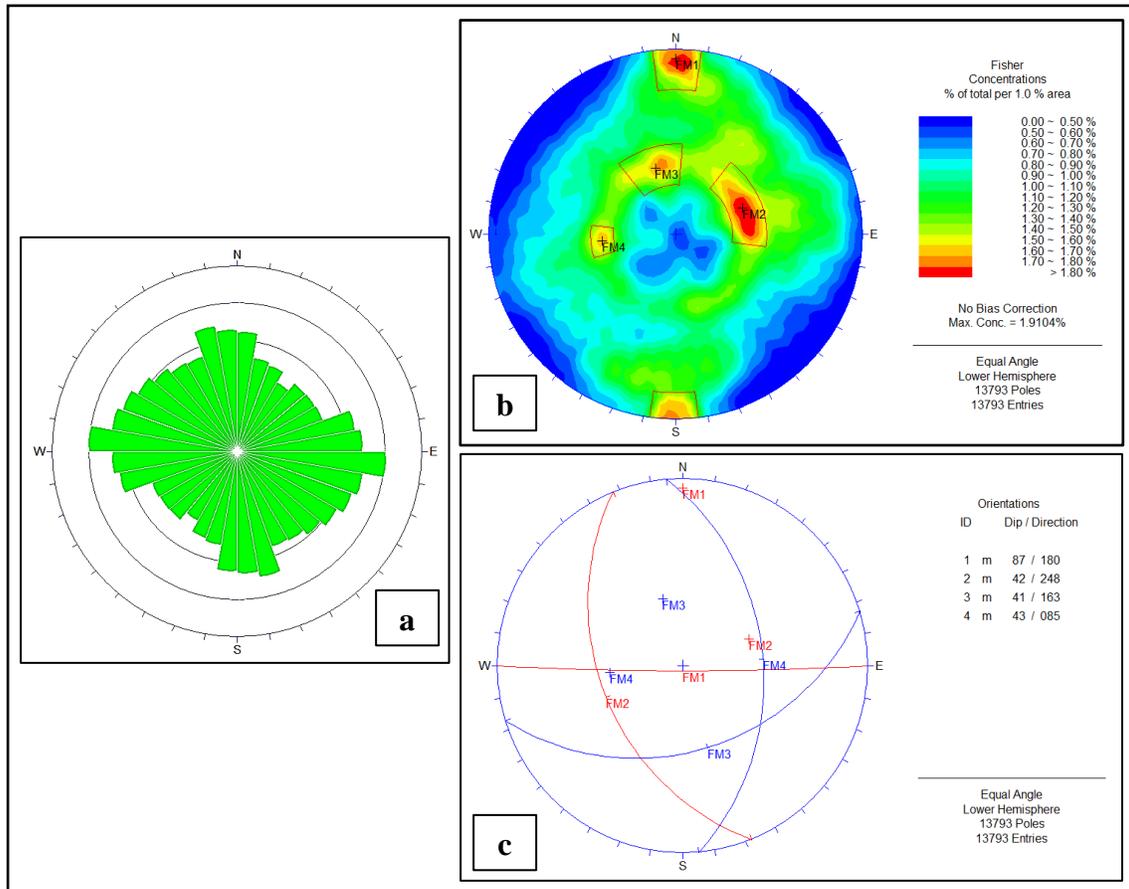


Figura 57. Análisis estadístico en el software Dips para el cuerpo Zeus: a) Diagrama de roseta, indicando las 2 tendencias principales de las discontinuidades. b) Diagrama de contornos, donde se indican las 4 familias de discontinuidades principales. c) Representación estereográfica de las familias de discontinuidades.

De las 16 fallas geológicas identificadas y presentadas en el modelo, se destacan cuatro, las cuales delimitan el cuerpo Zeus e influyen significativamente en la calidad del macizo rocoso, tendiendo a ser zonas de mala calidad e inestables.

- Limite Norte: está definido por una discontinuidad (Falla 14) con un alto ángulo de buzamiento que puede estar entre 70° y 90° , con dirección de buzamiento media de 180° .
- Limite Sur: lo define la discontinuidad nombrada como Falla 5 que sigue una dirección de buzamiento cercana a 165° y un buzamiento entre 45° y 70° .

- Limite Este: la Falla 7 delimita el cuerpo por este costado, con ángulos de buzamiento entre 45° a 70°, una dirección de buzamiento media de 85°.
- Limite Oeste: está definido por una discontinuidad (Falla 1) con dirección de buzamiento 85°, y un buzamiento que puede estar entre 30° y 50°.

9.2. Clasificación geomecánica del macizo rocoso del nivel 1692

De acuerdo a la clasificación RMR, el nivel 1692, presenta un macizo rocoso de calidades muy variables, incluye desde un macizo rocoso de mala calidad (Tipo IV B) con un RMR entre 24 y 30, hasta un macizo rocoso de buena calidad (Tipo III A) con un RMR de 51; lo que en términos de clasificación GSI sería un macizo rocoso que está entre IF/MP hasta MF/B. Este rango de calidades tan amplio está ligado a propiedades geomecánicas tales como:

- **Resistencia a la compresión simple**

Según las caracterizaciones geomecánicas realizadas en el nivel 1692, el 9% es un macizo rocoso débil, rompe con 1 GP; el 22% es un macizo rocoso moderadamente duro de resistencia 1 a 2 GP; el 28% es un macizo duro, rompe de 2 a 3 GP y el 41% restante corresponde a un macizo rocoso muy duro que rompe de 3 a 4 GP (Figura 58a). Las resistencias más bajas (débil y moderadamente duro) están relacionadas principalmente a la litología de chert negro, pero también se encuentra estas resistencias en el basalto, dique y en algunos casos puntuales en el sulfuro que está siendo influenciado por condiciones estructurales en zonas próximas a un contacto litológico. Los macizos más competentes (duros y muy duros) se relacionan principalmente con el sulfuro y basalto, donde si bien es influenciado por condiciones estructurales, éstas no afectan las propiedades intrínsecas de la roca.

- **RQD y Espaciamiento**

Estos dos parámetros, si bien son diferentes dependen directamente del fracturamiento que presente el macizo rocoso. El comportamiento del fracturamiento es similar en todas las litologías, siendo más intenso próximo a una zona de contacto o en zonas donde confluyen dos o más familias de discontinuidades. El 71% del macizo rocoso del nivel 1692 presenta un RQD <50%, indicando que el fracturamiento está por arriba de 18 fr/m, y el espaciamiento entre las misma es < 0.06m. El otro 30% del macizo rocoso presenta un RQD de 52% donde las fracturas son menos frecuentes (16 fr/m) y el espaciamiento es un poco mayor (Figura 58c y 58d).

- **Condición de las discontinuidades**

Dentro de este parámetro se evaluaron 5 aspectos: 1) Persistencia, fue difícil cuantificar con exactitud, por tanto, se tomó un estándar de longitud de 3 a 10 m, ya que, no es común encontrar discontinuidades con longitudes inferiores a 3 m, si bien pueden existir, pero por efecto de la voladura dichas discontinuidades aumentan su longitud acorde al avance de la voladura misma que es de 3 a 4 m; tampoco se optó por clasificar discontinuidades con longitudes superiores a 10 m, pues se desconoce cuánto más a lo observado (3 a 4 m) sería la extensión de la discontinuidad; 2) Abertura, en general está en el rango de 0.1 a 1 mm, con algunos casos puntuales donde las discontinuidades presentan aberturas mayor a 1 mm. 3) Rugosidad, las superficies de las discontinuidades son en su mayoría lisas a ligeramente rugosas, exceptuando una zona de contacto en donde se observó desarrollo de superficies estriadas; 4) Relleno, en toda la sección los rellenos presentan espesores y durezas muy variables siendo los más comunes los rellenos carbonatados; 5) Alteración, el macizo rocoso ocupado por litologías como chert negro, diques y casos puntuales basalto está en un 7% muy alterado y 24% moderadamente alterado, siendo la argilitización la causante de estos estados; en el 69% del macizo rocoso, la silicificación afecta ligeramente la roca,

haciendo que la resistencia aumente; esta condición se da principalmente en el sulfuro y basalto (Figura 58b).

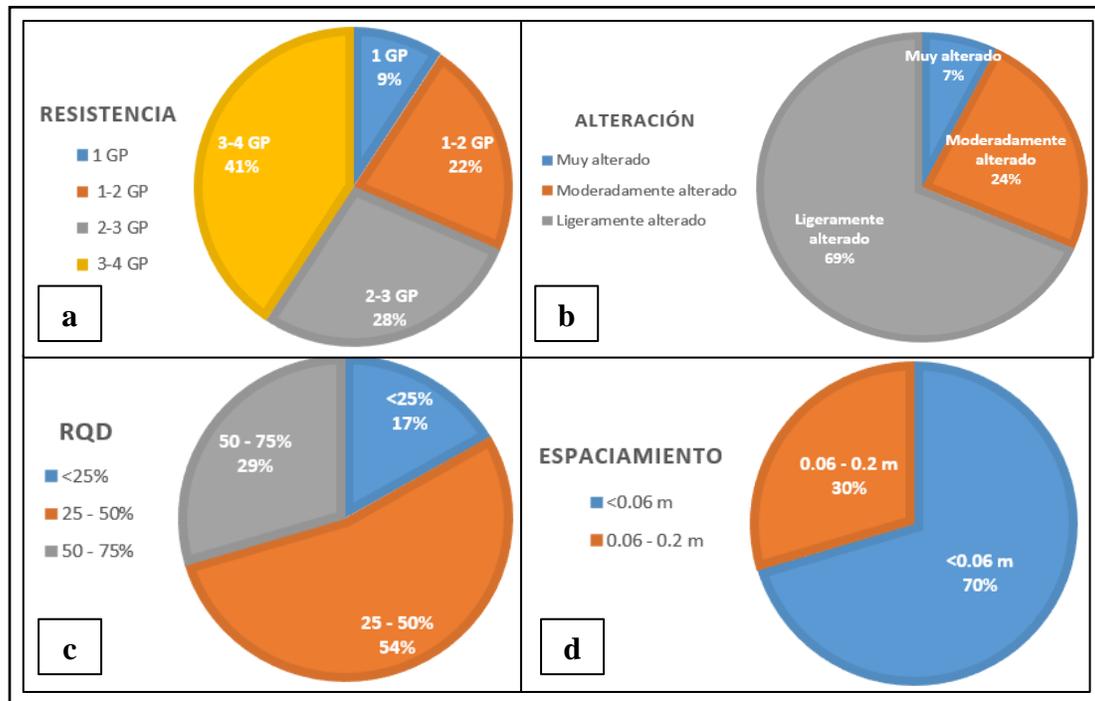


Figura 58. Representación porcentual de: a) Resistencia a la compresión simple; b) alteración; c) RQD; d) Espaciamiento.

- **Agua subterránea**

La presencia de agua subterránea es mínima, lo que llevó a determinar que en general el macizo rocoso presenta condiciones húmedas. Sin embargo, se evidenció hacia el SW del nivel, goteo constante, en zonas de contacto del sulfuro con chert negro, generando una disminución considerable de calidad del macizo rocoso y posibles inestabilidades.

- **Orientación de las discontinuidades**

La representación estereográfica de las discontinuidades principales en cada zona del nivel 1692, permitió determinar que: en la zona 3, las discontinuidades principales se sitúan paralelamente a los ejes de los tajos y ventana, predominando las condiciones muy desfavorables; en la zona 2, el avance de los tajos y galería respecto a las discontinuidades principales es perpendicular y contra el buzamiento, lo que indica condiciones regulares; y en la zona 1, el avance tanto de la galería y de los tajos respecto a las familias de discontinuidades en su mayoría es oblicuo, y va con el buzamiento; esto representó dificultades, ya que, la corrección de Bieniawski no contiene esta categoría, siendo necesario buscar las condiciones que más se adapten y realizar un promedio entre ellas.

9.3. Zonificación geomecánica

La zonificación geomecánica permitió representar por colores las calidades de macizo rocoso sobre los cuales se proyectaron las diferentes labores del nivel 1692 (Ver anexo I). Según el sistema de clasificación RMR (corregido), el 21% del macizo rocoso es de mala calidad, presenta un RMR entre 24 y 30; el 43% del macizo rocoso es de calidad regular, presenta un RMR 31 y 40; y el 34% del macizo rocoso, presenta un RMR de 41 a 50, un macizo de calidad moderada; y el 2% restante corresponde a un macizo de buena calidad, RMR igual a 51 (Figura 59a). En términos de clasificación GSI, el 62% es un macizo rocoso que varía entre IF/R, MF/R y MF/R-P; el 17% es un macizo rocoso entre IF/P, MF/P, MF/R-P; el 13% es un macizo rocoso IF/MP y IF/P-MP; y un 8% del macizo rocoso es MF/R-B y MF/B (Figura 59b).

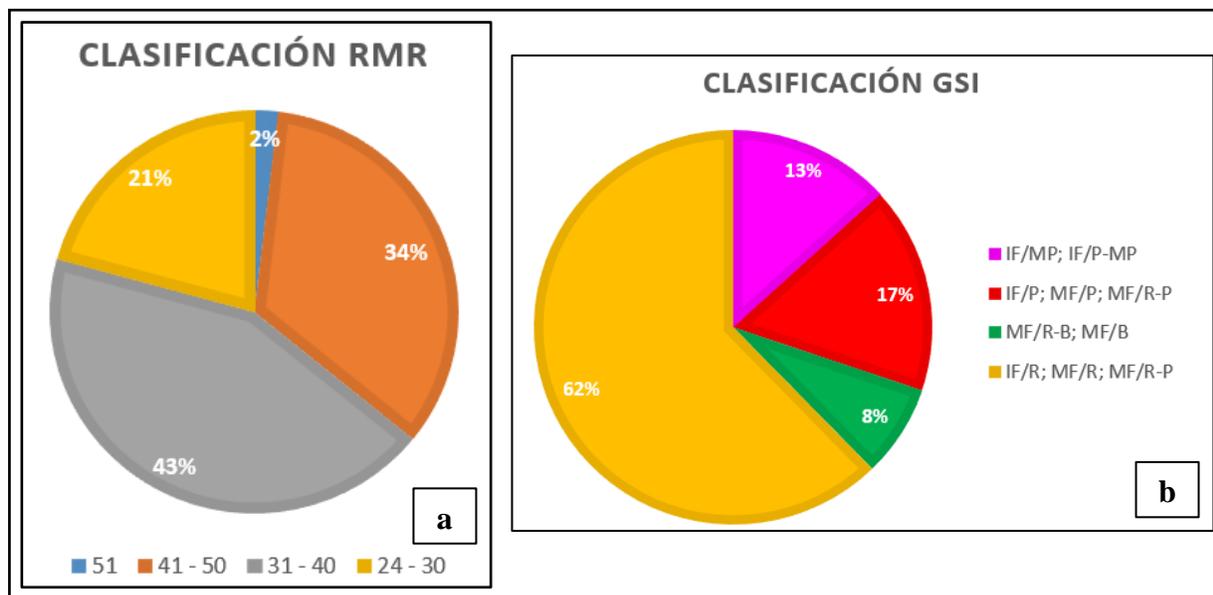


Figura 59. Representación porcentual del macizo rocoso del nivel 1692: a) Clasificación RMR; b) Clasificación GSI, nótese el uso de colores de acuerdo a la zonificación geomecánica (Ver anexo I).

9.4. Formación y estabilidad de cuñas

Para el caso de estudio, en el nivel 1692 se realizó un análisis para determinar la posible formación de cuñas, encontrando que, de acuerdo a la disposición de las principales familias de discontinuidades, la formación de cuñas es inminente. Sin embargo, determinar el mecanismo de falla (por gravedad o por deslizamiento) y la probabilidad de falla de estas cuñas de roca, durante la realización del presente trabajo no fue posible, pues requiere un análisis más amplio y preciso, que relacione la resistencia al corte del macizo rocoso y que involucra evaluar parámetros como la cohesión, ángulo de fricción, peso unitario de cada litología, tensión de los esfuerzos e inclusive la geometría de las labores subterráneas; parámetros que pueden llegar a ser muy complejos dada la variabilidad de los mismos. Por tanto, cuando se habla de que las labores subterráneas del nivel 1692 presentan condiciones favorables o desfavorables en relación a las cuñas de roca (Tabla 38), es solo una aproximación referente al riesgo asociado, que permitió identificar las zonas

potencialmente inestables, para que la recomendación de sostenimiento sea acorde tanto a la calidad del macizo rocoso como a la disposición de cuñas de roca y/o discontinuidades.

Tabla 38. Condición de las cuñas respecto a las labores subterráneas en el nivel 1692.

Tajos	Condición de las cuñas		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Avanzan hacia el E	Favorable	Favorable	-
Avanzan hacia el W	Desfavorable	Desfavorable	-
Avanzan hacia el N	-	-	Desfavorable
Galería	Condición de las cuñas		
	Zona 1	Zona 2	
	Desfavorable	Favorable	
Ventana norte	Condición de las cuñas		
	Zona 3		
	Favorable		
Ventana sur	Condición de las cuñas		
	Zona 1		
	Desfavorable		

9.5. Recomendaciones de sostenimiento

Las recomendaciones de sostenimiento para labores temporales y permanentes para el nivel 1692, se realizaron acorde al estándar de sostenimiento proporcionado por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017). En la tabla 39 y 40 se resume las recomendaciones de sostenimiento con base a la calidad del macizo rocoso según la clasificación RMR.

Tabla 39. Resumen sostenimiento para labores subterráneas temporales en el nivel 1692.

Labores subterráneas temporales		
Galería		
RMR	Sostenimiento	
	Tipo	Elementos
60 - 51	B	SH2" + PH8' @ 1.5 X 1.5m
50 - 41	C	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.5 X 1.5m
40 - 31	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m
30 - 21	E	SH2" (Reforzado) + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m
Tajos		
RMR	Sostenimiento	
	Tipo	Elementos
60 - 51	B	SH2" + SS7' @ 1.5 X 1.5m
50 - 41	C	SH2" + SS7' (Bóv) @ 1.5 X 1.5m
40 - 31	D	SH2" + SS7' (Bóv) @ 1.5 X 1.5m
30 - 21	E	SH2" (Reforzado) + M + SS7' (Bóv) @ 1.2 X 1.2m

Tabla 40. Resumen sostenimiento para labores subterráneas permanentes en el nivel 1692.

Labores subterráneas permanentes		
Ventanas - Cámara de servicio		
RMR	Sostenimiento	
	Tipo	Elementos
50 - 41	C	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.5 X 1.5m + SH1" (sobre malla)
40 - 31	D	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla)
30 - 21	E	SH2" + M(Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2m + SH1" (sobre malla) + ENF @ 1.0 X 1.0m

Para que la recomendación de sostenimiento sea eficaz, se tuvo en cuenta el tiempo de auto sostenimiento del macizo rocoso de Bieniawski (1989), que sugiere un periodo de tiempo que puede estar una labor subterránea sin ningún tipo de sostenimiento de acuerdo a su RMR y longitud del avance (Figura 60). Este ábaco, permitió establecer que en el mejor de los escenarios en el nivel 1692 donde existen RMR iguales a 51, el tiempo de auto sostenimiento esta alrededor de una semana, caso contrario, en zonas donde el macizo es de mala calidad de RMR inferiores a 30, el

tiempo de auto sostenimiento se reduce a horas. Esto llevó a plantear un principio conocido como “labor avanzada, labor sostenida”, sugiriendo que bajo ninguna circunstancia se podía realizar dos avances o voladuras continuas sin antes sostener por completo el primer avance, garantizando así, la seguridad en los frentes de trabajos.

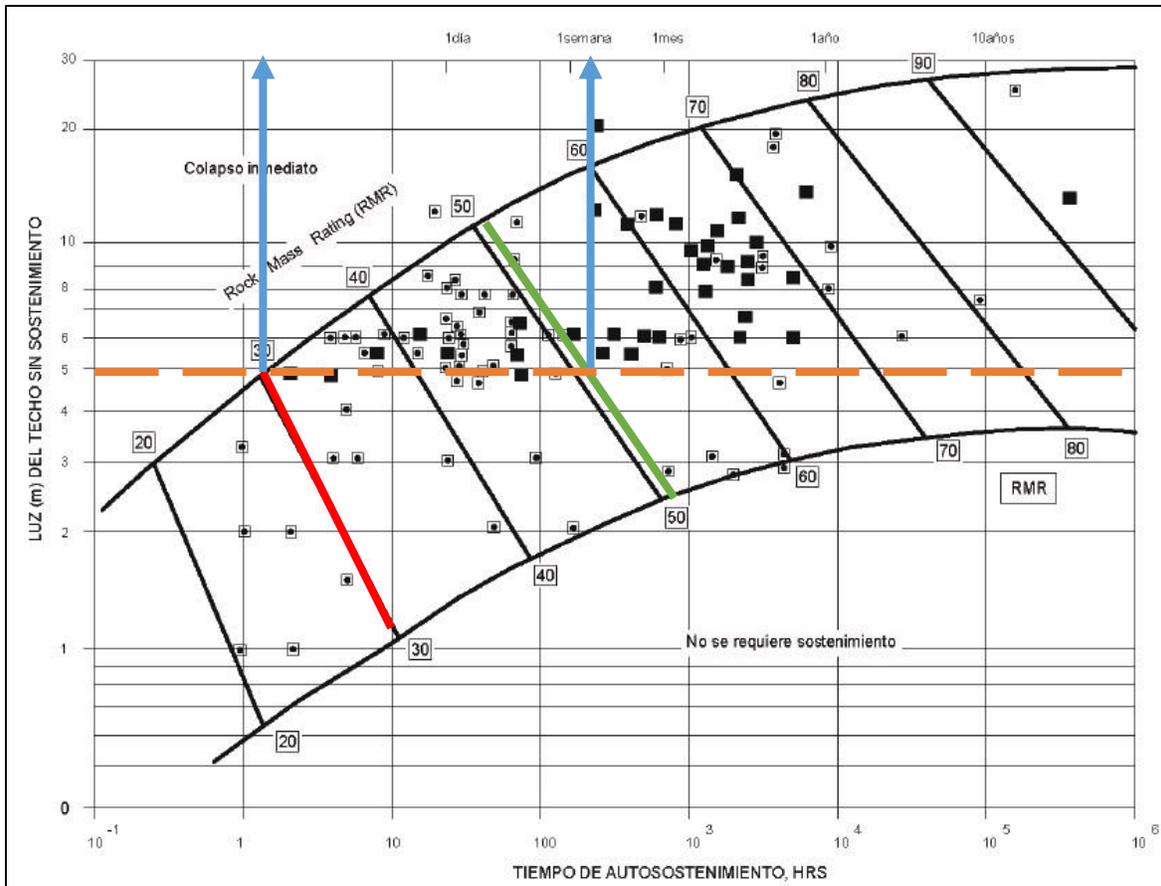


Figura 60. Abaco de tiempo de auto sostenimiento de Bieniawski (1989) para labores subterráneas. La línea naranja indica la altura promedio de una labor, la línea roja indica un macizo con un RMR de 30, línea verde un macizo con RMR de 51, y las líneas azules el tiempo promedio de auto sostenimiento (Tomado y modificado de Osinergmin, 2017).

10. Discusión

Como buena práctica, se realizó la comparación entre el modelo estructural del cuerpo Zeus presentado en este informe y el modelo dispuesto en el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017), encontrando que estos coinciden en la información de los niveles que comparten. No obstante, el modelo planteado integra nueva información estructural, que permite definir la tendencia de las fallas geológicas principales, las cuales en su mayoría conservan un buzamiento de alto ángulo y una dirección de buzamiento preferencial hacia el E ($87^{\circ}/180^{\circ}$; $41^{\circ}/163^{\circ}$; $43^{\circ}/85^{\circ}$), con excepción de algunas estructuras que están dispuestas hacia el interior del cuerpo, que tienen una dirección de buzamiento preferencial hacia el W con ángulos de buzamiento altos ($42^{\circ}/248^{\circ}$). El modelo también resalta otras condiciones estructurales posibles a encontrar de gran importancia como lo son las fallas geológicas que limitan al cuerpo Zeus. De modo que, su aplicación será amplia. Desde la parte operativa, podrá servir como referencia para monitorear el sostenimiento en áreas complejas estructuralmente y/o prever cambios abruptos en las calidades del macizo rocoso; desde la parte investigativa, permitirá diseñar futuros frentes a explotar y ampliar el conocimiento geológico-estructural del depósito.

Las discontinuidades principales del nivel 1692 en general presentan ángulos de buzamientos altos, con una dirección de buzamiento preferencial hacia el E, las cuales, de acuerdo al análisis estereográfico, guardan relación con las tendencias generales del cuerpo Zeus, que presenta dos tendencias principales 1) $87^{\circ}/180^{\circ}$; 2) $43^{\circ}/85^{\circ}$, que en notación cuadrantal pueden expresarse como una tendencia casi E-W con ángulos de buzamientos altos hacia el E y otra tendencia NNW – SSE, con ángulos de buzamiento altos hacia el E. Luego, la tendencia principal uno, es compatible con lo expuesto por Calle y Salinas (1989); quienes sugieren una estructura de carácter regional que exhibe una dirección SE-NW conocida como Falla La Mansa. Por otro lado, la segunda tendencia

principal, guarda completa relación con la Falla San Lorenzo, una falla de carácter regional que Espinal (2020), describe con dirección N-S, con buzamiento de alto ángulo hacia el E.

LOM (2015) expone “La colocación tardía del sostenimiento en un determinado tramo, favorece la relajación y descompresión del terreno, pudiendo ser la causa de manifestaciones de inestabilidad”; se comparte tal afirmación, pues de acuerdo a la experiencia del trabajo de campo y el presente análisis, en labores donde el macizo rocoso es de mala calidad con RMR inferiores a 31, se presenta una tendencia a sobre excavarse por el techo y los hastiales, por lo que su sostenimiento debe ser inmediato.

Espinal (2020) en su investigación concluye “Los contactos litológicos con disposición general en sentido NE-SW evidencian reactivación de fallas y desarrollo de zonas de cizalla esencialmente donde ocurren los mayores contrastes reológicos como en los contactos sulfuro/sedimentarios - basaltos-sedimentarios”. De acuerdo a lo determinado en este trabajo, existe concordancia con esta investigación, ya que, es común encontrar hacia los contactos litológicos estas zonas de cizalla que evidencian reactivación de falla, incluso se infiere dos eventos. Sin embargo, desde esta tesis no es posible asegurar ni proponer una dinámica en específico, pues este trabajo, tiene un enfoque diferente.

Un parámetro clave en la caracterización geomecánica es la alteración hidrotermal. En la mina El Roble, las alteraciones predominantes son silicificación y argilitización; la silicificación se evidenció principalmente en el sulfuro hacia el interior del nivel, contribuyendo considerablemente a mejorar la calidad del macizo rocoso, por otro lado, la argilitización produce el efecto contrario, disminuye la calidad del macizo rocoso, como se pudo notar en zonas de contacto litológicos.

El análisis de cuñas de roca, de acuerdo a las tres discontinuidades principales de cada zona del nivel 1692, sugiere la potencial formación de cuñas de roca de gran tamaño en bóvedas y techo de las labores. Ahora bien, afirmar que estas cuñas son estructuralmente estables sería incorrecto, pues

las condiciones de favorabilidad o desfavorabilidad se evaluaron solamente a partir del avance de las labores, ya que, no se contó con acceso a ensayos de laboratorio, que permitieran determinar propiedades específicas de cada litología presente en el nivel 1692. En concordancia con Martínez-Quiceno (2019), en tramos potencialmente inestables, se recomendó instalar malla con pernos helicoidales en algunos casos a gradiente y en otros solo a bóveda para garantizar la seguridad del personal.

11. Conclusiones

- La caracterización geomecánica obtenida basada en el RMR corregido, muestra que el nivel 1692 es un macizo rocoso de calidad regular (tipo IVA) a moderada (tipo III B), RMR entre 31 y 50, con una disminución a un macizo rocoso de mala calidad asociado a zonas de contacto litológico (tipo IV B), RMR de 24 a 31, y un leve incremento en la calidad en algunos sectores hacia el interior del nivel (tipo III A), RMR igual a 51.
- El nivel 1692 de acuerdo al sistema de clasificación GSI tiende a ser un macizo rocoso intensa a moderadamente fracturado con condiciones regulares a pobres (IF-MF/R-P), con cambios repentinos, donde las condiciones del macizo tienden a ser pobres a muy pobres (IF-MF/P-MP), pero también regulares a buenas (MF/R-B).
- En el nivel 1692 el sostenimiento más utilizado en labores subterráneas temporales como permanentes fue el tipo C y el tipo D, siendo el shotcrete (SH), pernos Split set (SS), pernos helicoidales (PH) y malla electrosoldada (M) los elementos de mayor uso. Caso contrario, el sostenimiento tipo E, que involucra la instalación de enfilajes (ENF) fue el menos utilizado. Este sostenimiento se ajustó a las condiciones y calidades encontradas en cada avance, contribuyendo a estabilizar los frentes de trabajo, garantizando la seguridad del personal y equipos durante toda la explotación.
- La zonificación geomecánica del nivel 1692 a partir de un RMR corregido, permitió definir las zonas con potencial riesgo de inestabilidad, basado en la calidad del macizo rocoso, la cual está siendo influenciada por la orientación de las discontinuidades principales. Además, es un referente para otros niveles, que se espera pueda ir mejorando conforme se detallan parámetros que influyen considerablemente en la calidad del macizo como es el grado y tipo de alteración dominante.

- En el nivel 1692, se evidenció un potencial riesgo por formación de cuñas que generan condiciones desfavorables en los tajos que tienen avance tanto al W como al N, galería parte sur y ventana sur, caso contrario, las cuñas presentan condiciones favorables en los tajos con avance hacia el E, galería parte norte y en la ventana norte.
- Los contactos litológicos del cuerpo Zeus son las zonas más críticas en términos de la estabilidad. Con el modelo estructural propuesto, se podrá estimar la disposición de las fallas de contacto que limitan al cuerpo Zeus en niveles próximos a explotar, permitiendo hacer una valoración previa de la calidad del macizo rocoso y del sostenimiento requerido, que son parámetros claves para definir la zona de acceso más conveniente a un nuevo nivel.
- Las fallas geológicas identificadas en el cuerpo Zeus, presentan dos tendencias principales: la primera, con un buzamiento medio de 87° y dirección de buzamiento media de 180° ($87^\circ/180^\circ$) que en notación cuadrantal puede expresarse como una tendencia casi E-W con ángulos de buzamientos altos hacia el E, la cual guarda completa relación con la Falla La Mansa, que tiene una tendencia SE-NW y alto ángulo de buzamiento preferencial hacia el E; la segunda tendencia principal, presenta un buzamiento medio de 43° y una dirección de buzamiento media de 85° ($43^\circ/85^\circ$), expresada en notación cuadrantal como una tendencia NNW-SSE, con alto ángulo de buzamiento preferencial hacia el E, se puede relacionar con la falla regional conocida como Falla San Lorenzo, que sigue un rumbo N-S, con un buzamiento preferencial hacia el E.

12. Recomendaciones

- Actualizar periódicamente el modelo estructural, adaptándolo a las nuevas condiciones encontradas, ya que, de esto depende la confiabilidad del mismo.
- Realizar un adecuado desate de frentes, de modo que se elimine cualquier situación potencialmente peligrosa y no genere afectaciones durante la instalación del sostenimiento.
- En lo posible garantizar un ciclo de minado, que permita avanzar en los frentes de acuerdo al tiempo establecido para su explotación, teniendo en cuenta el principio de “labor avanzada, labor sostenida”.
- Priorizar el sostenimiento en labores donde la calidad del macizo sea mala ($RMR < 31$).
- Realizar inspecciones geomecánicas periódicas en los diferentes lugares de trabajo, especialmente en labores temporales, donde se evalué el estado del sostenimiento, problemas de caída de roca, presencia de agua, entre otras; a fin de tomar medidas correctivas y mantener la seguridad y estabilidad de la mina.
- Realizar un reporte de las inspecciones geomecánicas para asegurar que todas las áreas de trabajo (Planeamiento, Seguridad, Operación mina, etc.) se encuentren informadas.
- Se recomienda al personal en general de la mina que, en casos adversos como caída de roca, no hacer frente a la situación, seguir los protocolos e informar al personal de Geomecánica, para tomar las medidas correspondientes.
- Capacitar al personal en general acerca de la percepción del riesgo dentro de una mina subterránea.
- Por último, se propone futuras líneas de investigación que involucren:
 - i. Análisis de mecanismo y probabilidad de falla de cuñas de roca.

- ii. Evaluación del estado de esfuerzos antes y durante la explotación, pues resulta de vital importancia delimitar las zonas con potencial influencia de esfuerzos inducidos, que puedan generar inestabilidad local.
- iii. Caracterización hidrogeológica, como herramienta predictiva que permita evaluar los potenciales efectos del agua en la estabilidad del macizo rocoso, especialmente en zonas de contacto, donde es más factible a encontrar presencia de agua y por lo general son las zonas más inestables. Además, es muy útil para prever la posible afectación a sostenimientos antiguos, ya que el agua facilita la corrosión del hierro, acero y shotcrete.
- iv. Modelo geológico, donde se represente de manera detallada las litologías presentes, grado y tipo de alteración, que como se sabe, es un parámetro que condiciona en general la resistencia del macizo rocoso.
- v. Modelo geomecánico, que reúna toda la información geológica, geomecánica, estructural, hidrogeológica y condiciones de los esfuerzos, que sirva de referencia a futuros proyectos de minería subterránea, permitiendo optimizar el estándar de sostenimiento.

13. Referencias

- Agencia Nacional de Minería. (2022). *Emergencias mineras*. Recuperado de: https://www.anm.gov.co/?q=emergencias_mineras.
- Álvarez, E., y González, H. (1978). *Geología y geoquímica del cuadrángulo I-7 Urrao*. INGEOMINAS, Medellín, Colombia. Recuperado de: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=130100101010001761000000000>.
- Arboleda, G., Celada, C., Forero, S., Montealegre, V., Padilla, J., Carmona, J., y Medina E. (2009). *Cartografía geológica y muestreo geoquímico en la parte norte de la cordillera occidental, planchas 165 y 185 (396 kilómetros cuadrados)*. Ingeominas, Bogotá, Colombia. Recuperado de: https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008005024266/76_Carto_geolgeoqca_Contr392/Cartografia_geologica_geoqca_Pl_165%20y%20185.pdf.
- Bedoya, G., Cediell, F., Restrepo, I., Cuartas, C., Montenegro, G., Marín, M. I., Mojica, J., y Cerón, R. (2009). *Aportes al conocimiento de la evolución geológica de las cuencas Atrato y San Juan dentro del arco Panamá-Chocó*. Boletín de Geología, Vol. 31 (2), 69-81. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832009000200005.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Recuperado de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pejDUvjwPdMC&oi=fnd&pg=PP13&dq=Bieniawski,+Z.+T.+\(1989\).+Engineering+Rock+Mass+Classifications:+a+Complete+M anual&ots=4UnhOA-2Ro&sig=ciGC7dp1qx0frRWX6N4vv0YkJBA#v=onepage&q=Bieniawski%2C%20Z](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pejDUvjwPdMC&oi=fnd&pg=PP13&dq=Bieniawski,+Z.+T.+(1989).+Engineering+Rock+Mass+Classifications:+a+Complete+M anual&ots=4UnhOA-2Ro&sig=ciGC7dp1qx0frRWX6N4vv0YkJBA#v=onepage&q=Bieniawski%2C%20Z).

%20T.%20(1989).%20Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications%3A%20a%20Complete%20Manual&f=false.

Brito, R., Mejía, P., y Vasconcelos, P. (2010). *Preliminary Ar-Ar U-Pb La ICPMS dating and the tectonic significance of andesitic porphyry dykes from El Roble Cu-Au VMS deposit - Eastern Cordillera-Colombia.* Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/266854488_Preliminary_Ar-Ar_U-Pb_La_ICPMS_dating_and_the_tectonic_significance_of_andesitic_porphyry_dykes_from_El_Roble_Cu-Au_VMS_deposit_-Eastern_Cordillera-Colombia.

Calle, B., y Salinas, R. (1984). *Geología de la plancha 165 Carmen de Atrato. Escala 1: 100.000.* INGEOMINAS, Medellín, Colombia. Recuperado de: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024266/mapa/pdf/0101242661300002.pdf>.

Calle, B., y Salinas, R. (1986). *Geología y geoquímica de la plancha 165 Carmen de Atrato. Escala 1: 100.000.* INGEOMINAS, Medellín, Colombia. Recuperado de: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024266/documento/pdf/0101242661101000.pdf>.

Consejo Colombiano de Seguridad. (2022). *Siniestralidad laboral en 2021.* Recuperado de: <https://ccs.org.co/siniestralidad-laboral-en-2021/>.

Cook, J. (2016). *La geomecánica. Oilfield review, Vol. 28, 51-53.* Recuperado de: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/la-geomecanica.ashx>.

Departamento de Geomecánica de la mina El Roble. (2017). *Presentación: Método de Explotación del Cuerpo Zeus.* Carmen de Atrato, Chocó, Colombia: Atico Mining Corporation.

Departamento de Planeamiento de la Mina El Roble. (2017). *Presentación: Modelo 3D del Cuerpo Zeus y Esquema de Minado.* Carmen de Atrato, Chocó, Colombia: Atico Mining Corporation.

- Echeverri, B., y Salas, J. (2017). *Geología del yacimiento El Roble: un VMS Cu-Au de alta ley, Colombia*. Medellín, Colombia. Recuperado de: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG17-052.pdf>.
- Espinal Corrales, J. (2020). *Caracterización y modelo estructural del yacimiento de sulfuros masivos volcanogénicos de la mina El Roble*. [Tesis de maestría presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería - Recursos Minerales]. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79981>.
- Etayo, F., Barrero, D., Lozano, H. Q., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, I., Forero, Hugo., Ramírez, C., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, R., Núñez, A., Álvarez, J., Ropaín, C., Cardozo, E., Galvis, N., Sarmiento, L., ... y Hodges, C. (1986). *Mapa de terrenos geológicos de Colombia: Publicaciones Geológicas especiales*. Ingeominas, Bogotá, Colombia.
- Feijoo, E. y Padrón, J. (2020). *La resistividad de las rocas y su relación con la resistencia a la compresión no confinada en una mina*. Universidad Ciencia Y Tecnología, Vol. 24 (99), 61-67. Recuperado de: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/296>.
- Franklin, J., Gibson, H., Jonasson, I., y Galley, A. (2005). *Volcanogenic Massive Sulfide Deposits (Vol. 100" Anniversary Volume)*. Society of Economic Geologists. Recuperado de: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/books/book/1940/chapter/107715708/Volcanogenic-Massive-Sulfide-Deposits?redirectedFrom=PDF>.
- Franklin, J., Lydon, J., y Sangster, D. (1981). *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits (Vol. 75" Anniversary Volume)*. Society of Economic Geologists. Recuperado de:

<https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/books/book/1820/chapter/107705351/Volcanic-Associated-Massive-Sulfide-Deposits>.

Gómez-Rodríguez, M. (2022). *Caracterización, Zonificación Geomecánica y Recomendación del Sostenimiento Necesario Para la Estabilidad de Labores Temporales y Permanentes del Macizo Rocoso en el Nivel 1712 del Cuerpo Zeus de la Mina El Roble*. [Informe de práctica académica presentada como requisito parcial para optar al título de: Geólogo]. Universidad de Caldas.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid, España.

Gutiérrez-Hernández, C. (2019). *Caracterización geomecánica y recomendación de elementos de sostenimiento necesarios para la estabilidad de las labores temporales y permanentes del macizo rocoso en el nivel 1727 de la mina El Roble*. [Tesis de pregrado presentada como requisito parcial para optar al título de: Geólogo]. Universidad de Caldas.

Kelly, T. (2018). *El Roble Mine Updated Mineral Resource and Initial Mineral Reserve Estimates*. Atico Mining Corporation, Vancouver, Canadá. Recuperado de: http://aticomining.com/_resources/technical-reports/Atico-technical-report-2018-final.pdf?v=0.559.

Kelly, T. (2021). *El Roble Mine Updated Mineral Resource and Initial Mineral Reserve Estimates*. Atico Mining Corporation, Vancouver, Canadá. Recuperado de: http://aticomining.com/_resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf?v=0.621.

Laboratorio Oficial J. M. Madariaga. (2015). *Guía sobre control geotécnico en minera subterránea*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Madrid, España.

Marinos, V., Marinos, P., y Hoek, E. (2005). *The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64; 55-65. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-004-0270-5>

Martínez-Quiceno, A. M. (2019). *Evaluación Geomecánica Para la Construcción de Ruta de Evacuación en la Mina El Roble con Tecnología Alimak*. Centro Geotécnico Internacional. Manizales, Colombia. Recuperado de: <https://www.centrogeotecnico.com/blog-geotecnia-geomecanica/tesina-evaluacion-geomecanica-para-construccion-de-ruta-de-evacuacion-en-mina-el-roble-con-tecnologia-alimak-colombia-julio-2019-angelica-maria-martinez-quiceno.html>.

Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas*. Bogotá, Colombia. Recuperado de: https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/698204/DOCUMENTO_ReglamentoSeguridadMineriaSubterranea.pdf/774e58ab-d35d-4d92-8e7e-fd63ec127216.

Ministerio de Minas y Energía. (2022). *Resolución número 40209 de 2022. Por medio de la cual se actualiza la Política Nacional de Seguridad Minera*. 10 de junio de 2022. Recuperado de: <https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/2022/06/Resolucio%CC%81n-40209-de-2022.pdf>.

Murillo-Bedoya, J. (2020). *PETROGRAPIC AND LITHO-GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE VMS DEPOSIT AT EL ROBLE MINE, COLOMBIAN WESTERN CORDILLERA*. [Tesis de pregrado presentada como requisito parcial para optar al título de: Geólogo]. Universidad EAFIT.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Lima, Perú.

- Ortiz, B. F. (1990). *El Roble, un yacimiento de sulfuros masivos volcanogénico*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 121-154. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/94882/78877>.
- Pardo-Trujillo, A., Cardona, A., Giraldo, S., León, D., Vallejo, R., Trejos, A., Plata, J., Ceballos, S., Echeverri, A., Barbosa, J., Slattery, A., Salazar, G., Botello, S., Celis, E., Osorio, C., y Giraldo-Villegas. (2020). *Sedimentary record of the Cretaceous–Paleocene arc–continent collision in the northwestern Colombian Andes: Insights from stratigraphic and provenance constraints*. *Sedimentary Geology*, Vol. 401. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0037073820300415>.
- Pratt, W. (2014). *New Targets at the El Roble Massive Sulfide, Chocó, Colombia*. Atico Mining Corporation, Vancouver, Canadá.
- Prodimin. (2021). *Catalogo minero*. Callao, Perú. Recuperado de: <https://prodac.bekaert.com/es-MX/la-empresa/biblioteca-de-catalogos-y-tripticos>.
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes. Volumen I*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Rodríguez G., y Arango, M. (2013). *Formación Barroso: arco volcánico toleítico y diabasas de San José de Urama: un prisma acrecionado T-MORB en el segmento norte de la cordillera occidental de Colombia*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Vol. 33,17-38. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169528792002>.
- Rodríguez, J. (2007). *Caracterización de macizos rocosos*. Universidad de Oviedo, Oviedo, España. Recuperado de: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/62365/2007Caracterizaci%C3%B3nMacizosRocosos.pdf?sequence=1>.

Sabino, C. (1992). *El proceso de investigación*. Editorial Panapo. Caracas, Venezuela. Recuperado de: http://paginas.ufm.edu/sabino/ingles/book/proceso_investigacion.pdf.

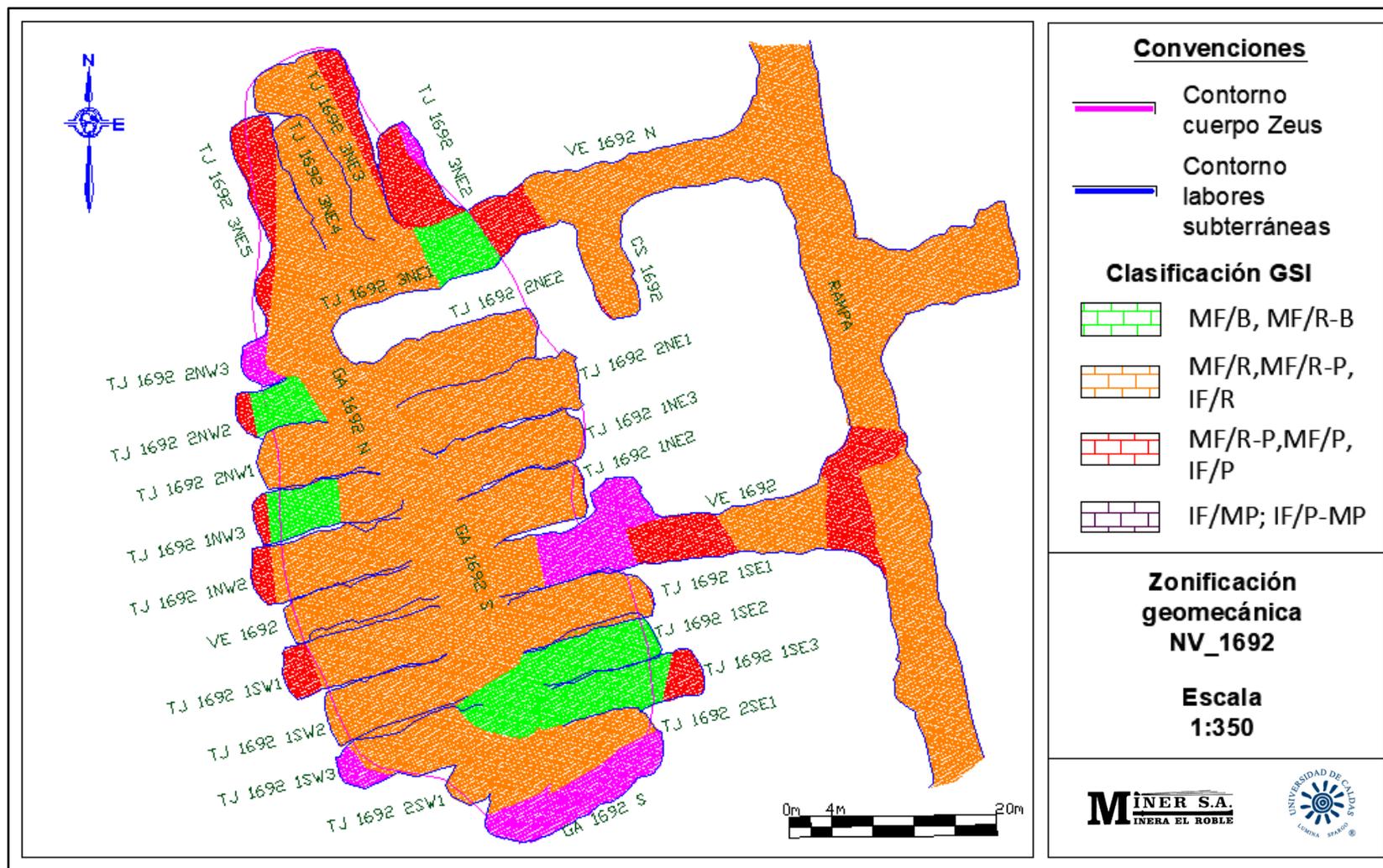
Smith, G., y Pohl, D. (2012). *Technical report on the El Roble project, Chocó Department, Colombia*. Atico Mining Corporation. Recuperado de: http://aticomining.com/_resources/technical-reports/2012-07-30_El_Roble_Technical_Report.pdf?v=0.559.

Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. (2004). *Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea*. Lima - Perú.

14. Anexos

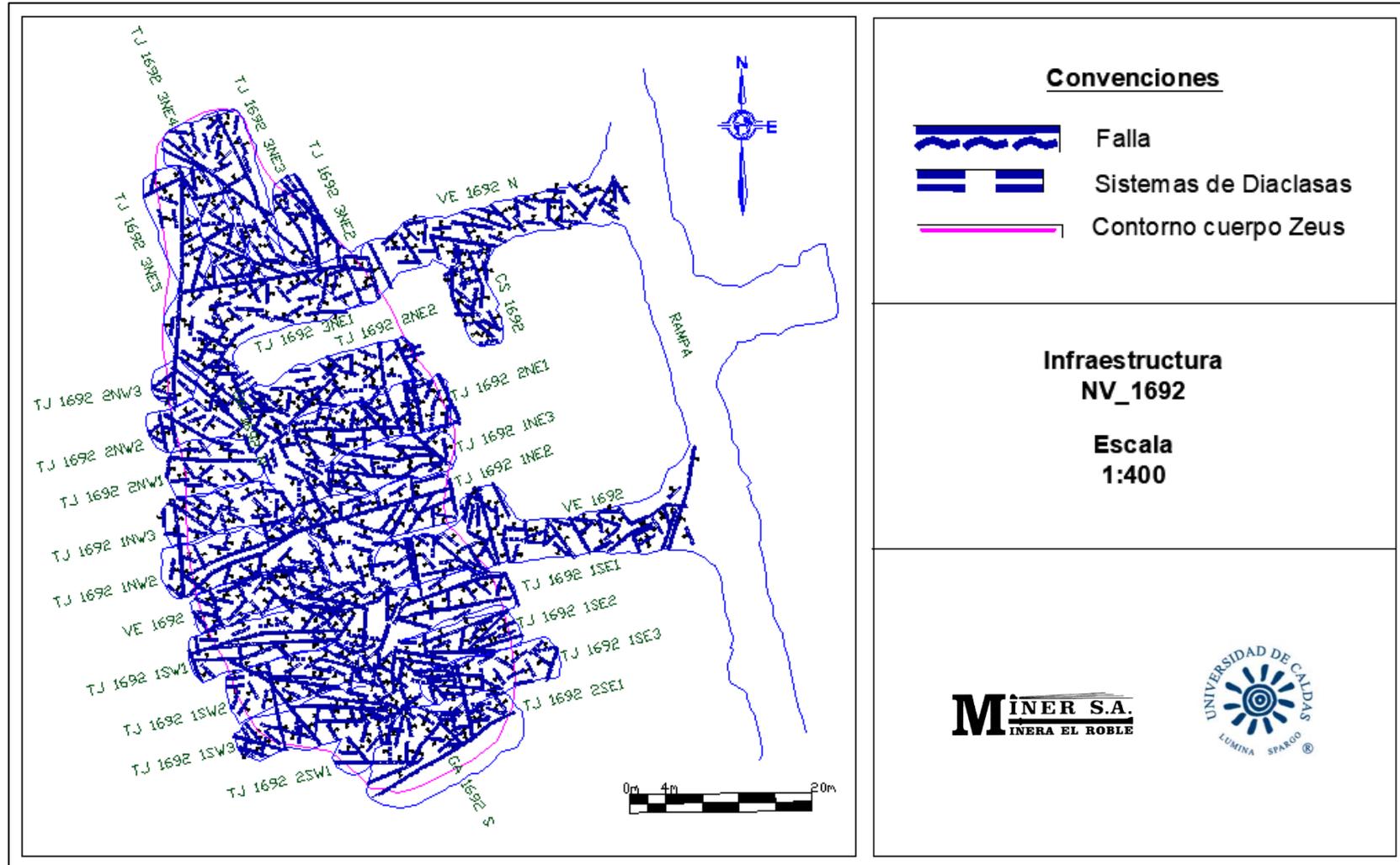
Anexo I

Zonificación geomecánica nivel 1692



Anexo II

Infraestructura nivel 1692



El mapeo geomecánico es una técnica que permite el levantamiento de información a detalle de las discontinuidades presentes en un macizo rocoso dentro de una labor subterránea; en consecuencia, se presenta este formato suministrado por el Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017), que ha sido adaptado de la versión original de Bieniawski (1989), el cual permite registrar de manera ordenada y detallada la distribución espacial y características de las discontinuidades para obtener una clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Para realizar esta actividad de la manera más apropiada se recomienda tener los siguientes materiales y herramientas: martillo geológico y/o martillo Schmidt, brújula tipo Brunton, flexómetro o distanciómetro, cámara fotográfica, linterna de mano, pintura en aerosol, libreta de campo, formatos de mapeo y caracterización. Además, siempre se debe contar con los elementos básicos de protección personal y seguridad como: casco de seguridad con portalámparas, lámpara minera, protector auditivo, guantes de neopreno, gafas de seguridad claras, botas de caucho caña alta con puntera de acero, respirador media cara con filtros para gases y polvo, overol con cintas reflectivas, chaleco con cintas reflectivas, correa o reata y autorescatador.

M INER S.A. MINERA EL ROBLE		MAPED GEOMECANICO EN LABORES SUBTERRANEAS										M INER S.A. MINERA EL ROBLE	
PROYECTO: Evaluación Geomecánica del Minado		Minera El Roble											
Nº ESTACION	ORIENTACION DE LA CARA		TRAMO		UBICACION		NIVEL:		REALIZA	FECHA	HOJA		
DIR. BUZA	BUZAMIENTO	DESDE	HASTA	SECTOR:						de			
VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)													
TIPO DE ROCA			FRECUENCIA FRACTURA		RANGO DE VALORES (VALOR ESTIMADO)						VALOR		
A	%	B	Nº Fract / m ²	R. COMPRESION UNIAxIAL (MPa)	>250 (16)	100-250 (17)	50-100 (7)	25-50 (8)	<25 (9)	<10 (1)	1		
				RQD %	90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	<25 (3)	2		
				ESPACIAMIENTO (m)	>2 (20)	0.5-2 (15)	0.2-0.5 (11)	0.05-0.2 (6)	<0.05 (3)	<0.05 (3)	3		
				PERSISTENCIA	>1m long (8)	1.0-1m long (4)	0.5-1m (2)	0.1-0.5m (1)	<0.1m (1)	>20 m (1)	4A		
				ABERTURA	<0.1mm apert. (8)	0.1-1mm (4)	1-5mm (1)	>5mm (1)	>5mm (1)	>5mm (1)	4B		
				CONDICION DE	May rugosa (8)	Rugosa (4)	Ligerosa (2)	Lisa (1)	Espajo de falla (1)	>5mm (1)	4C		
				JUNTAS	Limpia (8)	Dura < 5mm (4)	Dura > 5mm (2)	Suave < 5mm (1)	Suave > 5mm (1)	>5mm (1)	4D		
				ALTERACION	Seca (8)	Lig Alterada (4)	Med Alterada (2)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (1)	>5mm (1)	4E		
				AGUA SUBTERRANEA	Seco (16)	Humedo (10)	Mojado (7)	Grasa (1)	Flujo (1)	>5mm (1)	4F		
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 5) =													
CLASE DE MACIZO ROCOSO													
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 51	50 - 41	40 - 31	30 - 21	20 - 0						
DESCRIPCION	Tipo I	Tipo II	Tipo IIIA	Tipo IIIB	Tipo IVA	Tipo IVB	Tipo V						
R. (NUMERO DE REBOTE)				ABREVIACION DE TIPO DE RELLENO				ABREVIACION ESPACIAMEN.					
J	RQD	J	RQD	Ox	Oxido	Cal	Caliza	1 >2 m					
5	91	15	56	Arc	Arcilla	Lm	Limos	2 0.6 - 2 m					
6	88	16	52	Cb	Carbonatos	Py	Prilla	3 0.2 - 0.6 m					
7	84	17	48	ABREVIAC. TIPO DE ESTRUCTURAS				4 0.06 - 0.2 m					
8	81	18	44	J	Junta	C	Contacto	5 <0.06 m					
9	77	19	40	F	Falla	mF	Microfalla	RANGO UCS (MPa)					
10	74	20	37	ABREVIACION TIPO DE ROCA				R1	1 - 5				
11	70	21	33					R2	5 - 25				
12	66	22	29					R3	25 - 50				
13	63	23	26					R4	50 - 100				
14	59	24	22					R5	100 - 250				
								R6	>250				

Figura 1. Secciones formato de mapeo geomecánico y parámetros de clasificación geomecánica RMR (Ver anexo I). Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Ahora bien, el formato consta de 5 secciones (Figura 1): 1) encabezado; 2) tipo de roca; 3) datos estructurales; 4) parámetros para la clasificación geomecánica RMR; y 5) información adicional.

A continuación, se describe cada uno de los campos:

1. Encabezado

En los recuadros del encabezado se registra los siguientes datos:

- **Proyecto:** Se indica el nombre del cuerpo mineralizado.
- **Nº Estación:** Se registra el número del avance de la labor subterránea que se está evaluando.
- **Orientación de la cara:** Se registra la disposición del frente explotado.
- **Tramo:** Se registra la longitud del avance desde un punto de referencia (inicio y final del avance en metros)
- **Ubicación:** Se indica la zona o una referencia.
- **Nivel:** Se registra el nombre del nivel donde está el frente en explotación (Ej. NV 1697)
- **Sector:** Se registra el nombre del tajo en explotación (Ej. TJ 1697 5SW3)
- **Realiza:** Se registra el nombre de la persona que levanta la información.
- **Fecha:** Se registra la fecha en que se realiza el mapeo.
- **Hoja:** Cuando se realiza más de un mapeo geomecánico dentro de la misma labor se registra el número de páginas utilizadas (Ej. Pág. 1 de 2).

2. Tipo de roca

En los recuadros de tipo de roca se registra el porcentaje de cada litología existente en el frente que se está evaluando.

3. Datos estructurales

En los recuadros de datos estructurales se registra los siguientes datos:

- **Tipo Estructura:** Se especifica la abreviación del tipo de discontinuidad, ver parte 5 del formato.
- **Orientación:** Se registra el dato estructural de la discontinuidad en el sistema *Dip/ Dip Direction (D/DD)*.
- **Espaciamiento:** Se registra el espaciamiento entre discontinuidades, ver parte 5 del formato.
- **Relleno:** Se registra el tipo y espesor de relleno, ver parte 5 del formato.
- **Comentarios:** Se registra algún carácter en especial observado.

4. Parámetros para la clasificación geomecánica RMR

En esta sección se realiza la caracterización del macizo rocoso, ponderando los parámetros de resistencia a la compresión uniaxial de la roca, Rock Quality Designation (RQD), espaciamiento de las discontinuidades, condición de las discontinuidades y presencia del agua subterránea. Posteriormente se suman estos valores y se obtiene la clasificación RMR para ese macizo rocoso.

5. Información adicional

Dentro de esta sección se encuentran una serie de Tablas, que brindan información para la caracterización geomecánica del macizo rocoso.

- **Espaciamiento:** Indica los rangos de para determinar el espaciamiento.
- **Abreviación de tipo de relleno:** Indica los posibles tipos de rellenos con su respectiva abreviación.
- **Abreviación tipo de discontinuidad:** Indica las diferentes discontinuidades con su respectiva abreviación.
- **Abreviación tipo de roca:** Se registra el tipo de litología con su respectiva simbología.
- **Tabla de RQD:** Relaciona el número de discontinuidades con su respectivo porcentaje de RQD.

- **Rango UCS (MPa):** Indica los rangos de para determinar la resistencia a la compresión simple o uniaxial.
- **Numero de rebote:** Se registra el número de rebotes obtenidos con el martillo Schmidt.

Anexo IV

Estándar de sostenimiento y clasificación GSI para labores mineras temporales

VISTA FRONTAL									
MINA EL ROBLE SOSTENIMIENTO SEGUN G.S.I. (Modificado) LABORES MINERAS TEMPORALES (De 4.0 m a 6.0 m. Abertura)									
A	* M(Gdt) + PH8' @ 1.5 x 1.5 (Gdt) Segun Evaluación * SS7' @ 1.5 x 1.5 (Gdt) Segun Evaluación * Ga/*TJ	CONDICIONES	CONDICIONES	BUENA (muy resistente, fresca). Superficies de discontinuidades muy rugosas e inalteradas, fracturas cerradas. Se rompe con varios golpes de picota (más de 3 golpes) (Rc 100 a 250 MPa)	REGULAR (resistente, levemente alterado). Discontinuidades rugosas, ligeramente abiertas (menos a 1cm), relleno duro. Levemente alterado con manchas de oxidación. Se rompe con 1 a 2 golpes de pica (Rc 50 a 100 MPa).	POBRE (Moder. alter). Discontinuidades lisas o con estrías, moderadamente abiertas (entre 1cm a 5cm). Roca con Alteraciones Arcillosas moderadas. Relleno deleznable. Se indenta superficialmente con golpes de pica (1 a 5mm) y a un máximo de 1GP (Rc 25 a 50 MPa).	MUY POBRE (blanda, muy alterada). Discontinuidades pulidas o con estrías muy abiertas (mayor a 5cm). Relleno suave y arcillosos. Muy alterado. Se indenta mas de 5 mm (Rc 5 a 25 Mpa).		
B	* SH2" + PH8' @ 1.5 x 1.5 (Gdt) * SH2" + SS7' @ 1.5 x 1.5 (Gdte) * Ga/*TJ								
C	* SH2"+M(Gdt/Bov- Segun Evaluación)+PH8'/SS7' @ 1.5 x 1.5 + SB/PRESOP @ 1.2 x 1.2 x 4m (Por Evaluación.) * SH2" + SS7' @ 1.5 X 1.5 (Boveda) * Ga/*TJ								
D	* SH2"+M (Gdt)+PH8'/SS7' @ 1.2 x 1.2 + SH1" + SB/ENF @ 1.2 x 1.2 x 4m * SH2" + PH8' @ 1.5 x 1.5 (Boveda) * Ga/*TJ								
E	* SH2"(Reforzado)+M(Gdt)+PH8'/SS7' @ 1.2 x 1.2 + SH2" + SB/PRESOP @ 1.2 x 1.2 x 4 m * SH2" + M (Boveda) + PH8'/SS7' @ 1.2 x 1.2 (Gdt) * Ga/*TJ								
G	No se sugiere soporte por grado de criticidad (Colapso o Derrumbe)								
Nota: Guia de Sostenimiento recomendado, siempre bajo supervisión y valoración por parte del área de Geomecánica.									
ESTRUCTURA		RMR							
	FRACTURADO Muy bien trabada, no disturbada, bloques cubicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75%) 6 a 11 fracturas por metro)	75	(A) F/B	(A) F/R	(B) F/P	(C) F/MP	(D) F/MP		
	MUY FRACTURADO Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por 4 o mas sistemas de discontinuidades. (RQD 25 - 50%) (12 a 20 fracturas por metro)	65	(A) MF/B	(B) MF/R	(C) MF/P	(D) MF/MP	(E) MF/MP		
	INTENSAMENTE FRACTURADO Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques irregulares o angulosos. (RQD 0 - 25%) (más de 20 fracturas por metro)	55	(B) IF/B	(C) IF/R	(D) IF/P	(E) IF/MP	(E) IF/MP	(F) IF/MP	
		RMR	45	40	35	30	25	20	15

Estándar de sostenimiento y clasificación GSI para labores mineras permanentes

VISTA FRONTAL					
MINA EL ROBLE SOSTENIMIENTO SEGUN G.S.I. (Modificado) LABORES MINERAS PERMANENTES (De 4.0 m a 6.0 m. Abertura)					
A SH2" + PH8' @ 1.5 m X 1.5 m (Gdt) Por evaluación	CONDICIONES	BUENA (muy resistente, fresca). Superficies de discontinuidades muy rugosas e inalteradas, fracturas cerradas. Se rompe con varios golpes de picota (más de 3 golpes) (Rc 100 a 250 MPa)	REGULAR (resistente, levemente alterado). Discontinuidades rugosas, ligeramente abiertas (menos a 1cm), relleno duro. Levemente alterado con manchas de oxidación. Se rompe con 1 a 2 golpes de pica (Rc 50 a 100 MPa).	POBRE (Moder. alter). Discontinuidades lisas o con estrías, moderadamente abiertas (entre 1cm a 5cm). Roca con Alteraciones Arcillosas moderadas. Relleno deleznable. Se indenta superficialmente con golpes de pica (1 a 5mm) y a un máximo de 1GP (Rc 25 a 50 MPa).	
B M (Gdt) + PH8' @ 1.5 x 1.5 (Gdt) + SH1" (Sobre malla) Sostenimiento solo para ejecutar con Jumbo emperrador					
C SH2" + M (Gdt) + PH8' @ 1.5 X 1.5 + SH1" (Por evaluación) + SB/PRESOP @ 1.2 X 1.2 X 4m (Por evaluación) PresORTE para generar avances					
D SH2" + M (Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2 + SH1" + SB/ENF @ 1.0 X 1.0 X 4m PresORTE para generar avances					
E SH2" + M (Gdt) + PH8' @ 1.2 X 1.2 + SH2" + SB/ENF @ 1.0 X 1.0 X 4m PresORTE para generar avances					
F Cimbras THN 29/6W20 @ 1.0 X 1.0 + Encostillado madera/planchas acanaladas + SH2" (Reforzado) SB/PRESOP @ 1.2 X 1.2 X 4m. PresORTE para generar avances					
Nota: Guía de Sostenimiento recomendado, siempre bajo supervisión y valoración por parte del área de Geomecánica.					
ESTRUCTURA					
	RMR				
FRACTURADO Muy bien trabada, no disturbada, bloques cubicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75%) 6 a 11 fracturas por metro)	75	(A) F/B	(A) F/R	(B) F/P	(D) F/MP
MUY FRACTURADO Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por 4 o mas sistemas de discontinuidades. (RQD 25 - 50%) (12 a 20 fracturas por metro)	70	(B)	(B) MF/R	(C) MF/P	(D) MF/MP
INTENSAMENTE FRACTURADO Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques irregulares o angulosos. (RQD 0 - 25%) (más de 20 fracturas por metro)	65	(B)	(C) IF/R	(D) IF/P	(D) IF/MP
	60	(C) IF/B	(C) IF/R	(D) IF/P	(E) IF/MP
	55	(D)	(E)	(E)	(F)
	50	(D)	(E)	(E)	(F)
	RMR	45	40	35	30
		25	20	15	

Estas Tablas de clasificación fueron adecuadas de la clasificación original de Hoek y Marinos, (2000) por parte del Departamento de Geomecánica de la mina El Roble (2017), con el objetivo de clasificar el macizo rocoso de manera ágil y sencilla, teniendo como base la clasificación RMR; además, permite recomendar el sostenimiento necesario para estabilizar una labor subterránea temporal o permanente.

Las recomendaciones de seguridad y elementos de protección personal son las mismas que se mencionan en el **Anexo I**, así como los materiales y herramientas a utilizar.

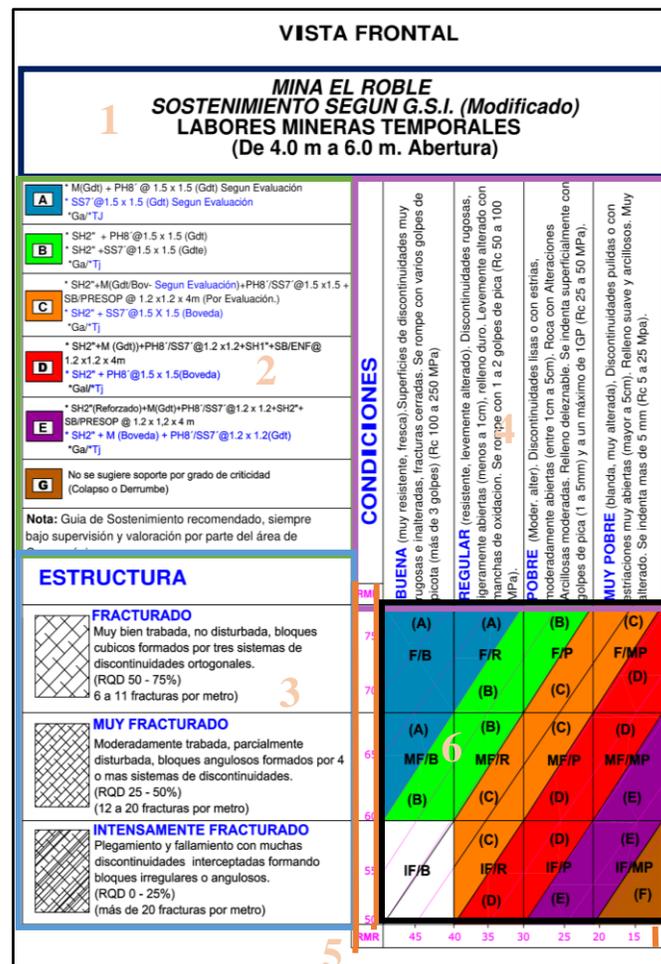


Figura 1. Secciones del estándar de sostenimiento y clasificación GSI para labores mineras subterráneas (Ver anexo II). Tomado y adaptado de Departamento de Geomecánica mina El Roble, 2017.

Estas Tablas cuentan con seis secciones: 1) el encabezado; 2) estándar de sostenimiento; 3) tipo de estructuras o grado de fracturamiento; 4) condición del macizo rocoso; 5) clasificación RMR; y 6) clasificación GSI. Las funciones de cada campo se describen a continuación:

1. Encabezado

En la mina El Roble existen labores subterráneas de carácter temporal y permanente; determinar la calidad del macizo rocoso se realiza de igual manera bajo los parámetros de la clasificación GSI. Sin embargo, el estándar de sostenimiento varía dependiendo del carácter de la labor subterránea, por ende, el encabezado permite identificar si la Tabla que vamos a emplear es acorde a la labor que se está evaluando.

2. Estándar de sostenimiento

El recuadro de estándar de sostenimiento contiene las especificaciones técnicas y/o criterios necesarios para realizar una óptima recomendación de sostenimiento para una labor subterránea de carácter temporal o permanente según la calidad del macizo rocoso.

3. Tipo de estructuras o grado de fracturamiento

Esta sección permite identificar y definir el grado de fracturamiento del macizo rocoso, según el número de fracturas que este presente.

4. Condición del macizo rocoso

En este apartado se muestran las posibles condiciones que puede presentar un macizo rocoso; permite definir la categoría que más se adapte según las observaciones realizada en campo.

5. Clasificación RMR

Estos recuadros situados a los costados de la sección seis (6), sirven de apoyo para buscar una equivalencia de la clasificación RMR a la clasificación GSI.

6. Clasificación GSI

El recuadro relaciona el grado de fracturamiento, la condición del macizo y la clasificación RMR, para obtener la calidad del macizo rocoso en términos de clasificación GSI. Según esta clasificación se realiza la recomendación del sostenimiento según el estándar de sostenimiento (sección 2).

Anexo V

Caracterización y clasificación geomecánica nivel 1692: zona 1

Estación VO	Litología	Resistencia (GP)	Puntaje	Fr/m	% RQD	Puntaje	Espaciamiento (m)	Puntaje	Condición							Agua subterránea	Puntaje	Valor total RMR Básico	Corrección por orientación de discontinuidades		Valor total RMR Corregido	Clase de macizo rocoso	Calidad	Clasificación GSI			
									Persistencia (m)	Puntaje	Abertura (mm)	Puntaje	Rugosidad	Puntaje	Relleno (mm)				Puntaje	Alteración					Puntaje	Condición	Puntaje
23	Sulfuro	3-4	10	14	59	13	0.071	8	3-10	2	1	1	Ligera/	3	Blandos <5	1	Ligera/	5	Húmedo	10	52.5	Media	-8.5	44.0	III B	Moderada	MF/R
24	Sulfuro	3	7	17	48	8	0.059	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros <5 y Blando <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	46.5	Media	-8.5	38.0	IV A	Regular	MF/R
25	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros <5	4	Ligera/	5	Húmedo	10	49.5	Media	-8.5	41.0	III B	Moderada	MF/R
26	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros <5	4	Ligera/	5	Húmedo	10	49.5	Media	-6	43.5	III B	Moderada	MF/R
27	Sulfuro	3-4	10	20	37	8	0.050	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros <5 y Blando <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	48.0	Media	-8.5	39.5	IV A	Regular	MF/R
28	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Goteo	4	41.5	Media	-8.5	33.0	IV A	Regular	MF/R-P
29	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Media	-8.5	39.0	IV A	Regular	MF/R
30	Sulfuro	3-4	10	16	52	13	0.063	8	3-10	2	1	1	Lisa a ligera/	2	Duros <5 y Blando <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	53.0	Regular	-5	48.0	III B	Moderada	MF/B
31	Sulfuro	3-4	10	22	29	8	0.045	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros <5 - Blando <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	48.0	Media	-8.5	39.5	IV A	Regular	IF/R

Estación VO	Litología	Resistencia (GP)		Fr/m	% RQD	Puntaje	Espaciamiento (m)	Puntaje	Condición										Agua subterránea	Puntaje	Valor total RMR Básico	Corrección por orientación de discontinuidades		Valor total RMR Corregido	Clase de macizo rocoso	Calidad	Clasificación GSI
		Puntaje	Puntaje						Persistencia (m)	Puntaje	Abertura (mm)	Puntaje	Rugosidad	Puntaje	Relleno (mm)	Puntaje	Alteración	Puntaje				Condición	Puntaje				
33	Sulfuro	2	4	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5 y Blando <5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	41.5	Media	-8.5	33.0	IV A	Regular	MF/R
35	Sulfuro	3	7	16	52	13	0.063	8	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5	2	Mod./	3	Goteo	4	46.0	Media	-6	40.0	IV A	Regular	MF/R
36	Sulfuro	4	12	16	52	13	0.063	8	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5 y Blando <5	1	Ligera/	5	Húmedo	10	57.0	Media	-6	51.0	III A	Buena	MF/B
38	Sulfuro	3-4	10	15	55	13	0.067	8	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	54.5	Media	-6	48.5	III B	Moderada	MF/B
39	Sulfuro	3-4	10	20	37	8	0.050	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5 y <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	49.5	Media	-6	43.5	III B	Moderada	MF/R
45	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Media	-8.5	39.0	IV A	Regular	MF/R
24	Kbc	2	4	17	48	8	0.059	5	3-10	2	1	1	Ligera/	3	Duros <5 - Blando <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	40.5	Media	-8.5	32.0	IV A	Regular	MF/R
32	Kbc	1-2	3	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Blandos >5	0	Ligera/	5	Goteo	4	27.0	Muy favorable	0	27.0	IV B	Mala	IF/MP
34	Kbc	1-2	3	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Duros >5	2	Mod./	3	Goteo	4	27.0	Muy favorable	0	27.0	IV B	Mala	IF/MP
35	Kbc	2-3	6	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Blando >5	0	Mod./	3	Goteo	4	29.5	Media	-6	23.5	IV B	Mala	IF/MP
37	Kbc	1-2	3	22	29	8	0.045	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Duros >5 y Blando <5	2	Mod./	3	Húmedo	10	37.5	Muy favorable	0	37.5	IV A	Regular	IF/P

Estación VO	Litología	Resistencia (GP)		Fr/m	% RQD		Espaciamiento (m)	Puntaje	Condición								Agua subterránea	Puntaje	Valor total RMR Básico	Corrección por orientación de discontinuidades		Valor total RMR Corregido	Clase de macizo rocoso	Calidad	Clasificación GSI		
		Puntaje	Puntaje		Persistencia (m)	Puntaje			Abertura (mm)	Puntaje	Rugosidad	Puntaje	Relleno (mm)	Puntaje	Alteración	Puntaje				Condición	Puntaje						
40	Kbc	1-2	3	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Blandos >5	0	Muy alterado	2	Húmedo	10	30.0	Media	-6	24.0	IV B	Mala	IF/MP
44	Kbc	1	2	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Blandos >5	0	Muy alterado	2	Húmedo	10	30.0	Media	-6	24.0	IV B	Mala	IF/MP
42	Basalto	3	7	14	59	13	0.071	8	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Mod./	3	Húmedo	10	51.0	Media	-6	45.0	III B	Moderada	MF/R
43	Basalto	2	4	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Duros >5	2	Muy alterado	2	Húmedo	10	33.0	Media	-6	27.0	IV B	Mala	IF/P
24	Dique	2-3	6	17	48	8	0.059	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros <5 y Blando <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	45.0	Media	-8.5	36.5	IV A	Regular	MF/R-P
43	Dique	2-3	6	17	48	8	0.059	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros <5 y Blando <5	3	Mod./	3	Húmedo	10	43.0	Media	-6	37.0	IV A	Regular	MF/P
45	Dique	2-3	6	19	40	8	0.053	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	43.5	Media	-6	37.5	IV A	Regular	MF/R

Caracterización y clasificación geomecánica nivel 1692: zona 2

Estación VO	Litología	Resistencia (GP)	Puntaje	Fr/m	% RQD	Puntaje	Espaciamiento (m)	Puntaje	Condición										Agua subterránea	Puntaje	Valor total RMR Básico	Corrección por orientación de discontinuidades		Valor total RMR Corregido	Clase de macizo rocoso	Calidad	Clasificación GSI
									Persistencia (m)	Puntaje	Abertura (mm)	Puntaje	Rugosidad	Puntaje	Relleno (mm)	Puntaje	Alteración	Puntaje				Condición	Puntaje				
15	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Medio	-8.5	39.0	IV A	Regular	MF/R
17	Sulfuro	3-4	10	16	52	13	0.063	8	3-10	2	1	1	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	52.5	Regular	-5	47.5	III B	Moderada	MF/R-B
19	Sulfuro	3-4	10	22	29	8	0.045	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros <5 - Blando <5	3	Ligera/	5	Húmedo	10	48.0	Media	-8.5	39.5	IV A	Regular	IF/R
20	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Medio	-8.5	39.0	IV A	Regular	MF/R
22	Sulfuro	3-4	10	14	59	13	0.071	8	3-10	2	1	1	Ligera/	3	Blandos <5	1	Ligera/	5	Húmedo	10	52.5	Regular	-5	47.5	III B	Moderada	MF/R-B
47	Sulfuro	3	7	14	59	13	0.071	8	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Mod./	3	Húmedo	10	51.0	Medio	-8.5	42.5	III B	Moderada	MF/R
48	Sulfuro	3-4	10	16	52	13	0.063	8	3-10	2	1	1	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	52.5	Medio	-8.5	44.0	III B	Moderada	MF/R-B
49	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Regular	-5	42.5	III B	Moderada	MF/R
16	Kbc	1-2	4	21	33	8	0.048	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa	1	Blando >5	0	Mod./	3	Goteo	4	31.0	Regular	-5	26.0	IV B	Mala	IF/P-MP
18	Kbc	2	4	20	37	8	0.050	5	3-10	2	1	1	Lisa a ligera/	2	Duros >5 y Blando <5	2	Mod./	3	Húmedo	10	36.5	Regular	-5	31.5	IV A	Regular	MF/R-P
21	Dique	2-3	6	20	37	8	0.050	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Blandos <5	1	Ligera/	5	Húmedo	10	43.5	Medio	-8.5	35.0	IV A	Regular	MF/R
46	Dique	2-3	6	17	48	8	0.059	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	43.5	Regular	-5	38.5	IV A	Regular	MF/R
49	Dique	2-3	6	20	37	8	0.050	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Blandos <5	1	Ligera/	5	Húmedo	10	43.5	Regular	-5	38.5	IV A	Regular	MF/R

Caracterización y clasificación geomecánica nivel 1692: zona 3

Estación VO	Litología	Resistencia (GP)	Puntaje	Fr/m	% RQD	Puntaje	Espaciamiento (m)	Puntaje	Condición							Agua subterránea	Puntaje	Valor total RMR Básico	Corrección por orientación de discontinuidades		Valor total RMR Corregido	Clase de macizo rocoso	Calidad	Clasificación GSI			
									Persistencia (m)	Puntaje	Abertura (mm)	Puntaje	Rugosidad	Puntaje	Relleno (mm)				Puntaje	Alteración					Puntaje	Condición	Puntaje
04	Sulfuro	3-4	10	16	52	13	0.063	8	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5	2	Ligera/	5	Mojado	7	53.5	Media	-6	47.5	III B	Moderada	MF/B
05	Sulfuro	3	7	16-18	52	11	0.063	8	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	51.5	Muy desfavorable	-12	39.5	IV A	Regular	IF/R
08	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Media	-6	41.5	III B	Moderada	MF/R
10	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Media	-6	41.5	III B	Moderada	MF/R
11	Sulfuro	4	12	14	59	13	0.071	8	3-10	2	1	1	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	55.0	Media	-6	49.0	III B	Moderada	MF/R
12	Sulfuro	3-4	10	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	47.5	Media	-6	41.5	III B	Moderada	MF/R
13	Sulfuro	2-3	6	16	52	13	0.063	8	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	51.5	Media	-6	45.5	III B	Moderada	MF/R
06	Kbc	1	2	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	36.0	Muy desfavorable	-12	24.0	IV B	Mala	IF/P
09	Kbc	1-2	3	22	29	8	0.045	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5	2	Mod./	3	Húmedo	10	40.0	Muy desfavorable	-12	28.0	IV B	Mala	IF/P
14	Kbc	1	2	24	22	3	0.042	5	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	36.0	Media	-6	30.0	IV B	Mala	IF/P
01	Basalto	3	7	17	48	8	0.059	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Duros >5	2	Ligera/	5	Húmedo	10	45.0	Media	-6	39.0	IV A	Regular	MF/R
02	Basalto	2-3	6	16	52	13	0.063	8	3-10	2	0.1-1	4	Ligera/	3	Duros >5	2	Mod./	3	Húmedo	10	50.0	Muy desfavorable	-12	38.0	IV A	Regular	MF/R
03	Basalto	3	7	15	55	13	0.067	8	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Blando <5	1	Muy alterado	2	Húmedo	10	49.0	Media	-6	43.0	III B	Moderada	MF/P
07	Dique	2	4	18	44	8	0.056	5	3-10	2	0.1-1	4	Lisa a ligera/	2	Blando <5	1	Mod./	3	Húmedo	10	39.0	Muy desfavorable	-12	27.0	IV B	Mala	MF/P-MP

Anexo VI

Datos estructurales nivel 1692: Zona 1

VE 1692		
Dato N°	Dip	Dip Dir
1	45	170
2	90	0
3	45	230
4	55	85
5	70	195
6	85	75
7	88	175
8	40	250
9	25	245
10	87	190
11	65	245
12	85	185
13	20	70
14	55	140
15	64	25
16	90	0
17	70	45
18	85	200
19	85	10
20	85	225
21	65	135
22	40	347
23	30	305
24	72	125
25	60	230
26	50	131
27	83	7
28	75	14
29	76	165
30	37	225
31	65	150

VE 1692		
Dato N°	Dip	Dip Dir
32	60	245
33	68	155
34	90	0
35	25	250
36	90	0
37	75	50

GA 1692 S		
Dato N°	Dip	Dip Dir
38	90	0
39	90	0
40	85	40
41	90	0
42	75	20
43	85	90
44	80	190
45	90	0
46	68	100
47	75	240
48	70	140
49	90	0
50	90	0
51	75	80
52	55	180
53	75	95
54	80	300
55	50	270

TJ 1692 2SE2		
Dato N°	Dip	Dip Dir
56	80	95
57	85	185
58	55	110
59	80	205
60	35	30

TJ 1692 2SE1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
61	73	355
62	67	200
63	30	320
64	80	95
65	85	185
66	55	110
67	80	205
68	35	30
69	85	175
70	70	85
71	60	145
72	75	310
73	85	210
74	85	190
75	35	360
76	70	45
77	35	5
78	80	250
79	55	355
80	65	175

TJ 1692 2SE1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
81	45	360
82	80	140
83	45	215
84	75	320
85	70	80
86	60	355
87	45	55
88	80	150
89	65	20
90	70	160

TJ 1692 1SW2		
Dato N°	Dip	Dip Dir
91	87	186
92	45	180
93	25	350
94	70	245
95	43	185
96	87	190
97	40	345
98	28	330
99	53	205
100	80	195
101	85	225
102	40	355
103	80	80
104	80	105

TJ 1692 1NW2		
Dato N°	Dip	Dip Dir
105	85	165
106	60	316
107	35	215
108	63	135
109	80	78
110	45	110
111	15	25
112	87	195
113	30	120
114	70	140
115	40	80
116	55	37
117	35	88
118	50	41
119	60	20
120	63	98
125	63	355
126	70	190

TJ 1692 1NE1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
121	78	360
122	58	120
123	73	125
124	60	10

TJ 1692 1SE1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
132	10	88
133	43	130
134	60	310
135	73	350
136	54	15
137	28	160
138	45	90
141	82	360
142	47	20
143	38	270
144	42	145
147	80	360
148	45	25
149	37	315
150	75	150
162	74	175

TJ 1692 1SW1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
127	40	125
128	42	190
129	60	15
130	48	360
131	50	225

TJ 1692 1SW3		
Dato N°	Dip	Dip Dir
139	82	205
140	15	290
145	24	54
146	18	250
151	84	25
152	88	25
153	12	180
154	76	75
155	80	200
156	14	100
157	30	213
158	60	200
159	55	85
160	60	30
161	21	220
163	78	50
164	85	20
165	85	210
168	10	10
169	62	200
170	10	80
171	82	265
172	64	190
178	65	355
179	50	316
180	20	160
181	18	150
182	20	250

TJ 1692 2SW1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
173	80	130
174	75	285
175	35	50
176	60	5
177	20	280

TJ 1692 1SE3		
Dato N°	Dip	Dip Dir
183	64	230
184	53	200
185	65	185
186	60	265
187	35	150
188	72	205
189	75	330
190	65	55
191	58	355
192	50	130

Datos estructurales nivel 1692: Zona 2

GA 1692 N		
Dato N°	Dip	Dip Dir
1	68	225
2	45	355
3	40	20
4	45	240
5	81	165
6	85	245
7	67	245
8	47	55
9	40	345
10	65	270
11	90	0
12	80	200
13	65	10
14	80	30
15	40	250
16	90	0
17	90	0
18	80	255
19	40	0
20	60	215
21	30	30
22	70	215
23	50	290
24	90	0
25	90	0
26	75	225
27	30	315
28	75	210
29	45	320
30	65	180
31	85	220

GA 1692 N		
Dato N°	Dip	Dip Dir
32	85	230
33	80	310
34	35	250
35	90	0
36	85	220
37	43	300
38	20	320
39	50	210
40	85	360
41	35	120
42	80	180
43	75	210
44	75	20
45	15	295
46	15	280
47	80	285
48	70	215
49	85	155

TJ 1692 2NE1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
50	45	60
51	80	110
52	85	340
53	40	140
54	45	335
55	85	180
56	65	210
57	75	80
58	65	260
59	85	245
60	30	110
61	85	95
62	85	165

TJ 1692 2NW1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
63	90	0
64	85	190
65	80	360
66	55	220
67	60	225
68	75	10
69	85	185
70	55	235
71	85	190
72	80	360
73	55	220
74	85	15
75	65	276
76	45	235
77	81	321
78	55	20
79	65	96
80	40	354
81	45	160

TJ 1692 2NE2		
Dato N°	Dip	Dip Dir
91	60	355
92	80	165
93	90	355
94	79	276
95	76	202
96	12	185
97	40	140
98	78	135
99	79	345
100	15	220
101	20	135

TJ 1692 2NE2		
Dato N°	Dip	Dip Dir
82	80	200
83	52	20
84	80	200
85	52	20
86	60	215
87	80	175
88	50	320
89	70	130
90	65	170

TJ 1692 1NE3		
Dato N°	Dip	Dip Dir
102	50	85
103	80	195
104	50	140
105	85	20
106	70	355
107	78	190
108	5	145
109	85	20
110	70	355
111	78	190
112	5	145
113	60	220
114	20	140
115	87	180
116	27	140
117	70	80

TJ 1692 1NW3		
Dato N°	Dip	Dip Dir
118	44	235
119	68	175
120	78	220
121	57	255
122	74	330
123	66	270
124	56	270
125	72	15
126	72	200
127	64	145

Datos estructurales nivel 1692: Zona 3

VE 1692 N		
Dato N°	Dip	Dip Dir
1	70	335
2	60	300
3	80	30
4	40	270
5	60	215
6	55	270
7	55	25
8	20	5
9	45	260
10	60	45
11	65	15
12	90	0
13	65	200
14	45	275
15	65	355
16	80	10
17	80	35
18	90	0
19	25	225
20	45	350
21	70	275

TJ 1692 3NE1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
22	60	125
23	45	20
24	65	130
25	60	150
26	65	220
27	70	20
28	30	155
29	30	320
30	20	90
31	85	10
32	25	145
33	75	170
34	65	225

TJ 1692 3NE1		
Dato N°	Dip	Dip Dir
35	40	350
36	85	180
37	80	320
38	15	105
39	85	110
40	80	185
41	55	255
42	60	345
43	80	10

TJ 1692 3NE3		
Dato N°	Dip	Dip Dir
44	80	247
45	78	206
46	70	240
47	43	100
48	62	110
49	68	228
50	40	260
51	40	235
52	45	210

TJ 1692 3NE5		
Dato N°	Dip	Dip Dir
53	40	270
54	65	50
55	65	90
56	46	285
57	54	152
58	65	270
59	52	50

TJ 1692 3NE4		
Dato N°	Dip	Dip Dir
60	58	5
61	51	334
62	44	210
63	61	320
64	40	45
65	27	72
66	18	295

TJ 1692 3NE2		
Dato N°	Dip	Dip Dir
67	87	82
68	79	110
69	20	320
70	70	40
71	55	305
72	15	245
73	67	225
74	22	220
75	78	150
76	35	260