

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS PARA
EL DISEÑO DE CÁMARAS EN LA MINA SAN VICENTE, 2022.**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR EL BACHILLER: DANNY DAYVIS SOSA LOZANO

ASESOR: JOHNNY HENRRY CCATAMAYO BARRIOS

AYACUCHO-PERÚ

2022

**UNSCH**FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL**“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 055-2022-FIMGC

En la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 205-2022-FIMGC-D**, siendo los dos días del mes de agosto del 2022, a horas 8:00 a.m.; se reunieron los jurados del acto de sustentación, en el Auditorium virtual google meet del Campus Universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Siendo el Jurado de la sustentación de tesis compuesto por el presidente el **Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**, Jurado el **MSc. Ing. Jaime PALOMINO CLAUDIO**, Jurado el **Mg. Ing. Roberto Juan GUTIÉRREZ PALOMINO**, Jurado Asesor el **MSc. Ing. Johnny Henry CCATAMAYO BARRIOS** y secretario del proceso el **Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**, con el objetivo de recepcionar la sustentación de la tesis denominada **“EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS EN LA MINA SAN VICENTE, 2022”**, sustentado por el Señor **Danny Dayvis SOSA LOZANO**, Bachiller en **Ciencias de la Ingeniería Minas**.

El Jurado luego de haber recepcionado la sustentación de la tesis y realizado las preguntas, el sustentante al haber dado respuesta a las preguntas, y el Jurado haber deliberado; califica con la nota aprobatoria de **16 (dieciséis)**.

En fe de lo cual, se firma la presente acta, por los miembros integrantes del proceso de sustentación.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
GEOLOGÍA Y CIVIL*Dr. Efraín Elías Porras Flores*
DECANO

Firmado digitalmente por
Dr. Ing. Efraín Elías Porras
Flores
Fecha: 2022.08.06 09:00:44
-09'00'

Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES
Presidente



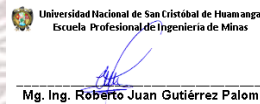
Firmado digitalmente
por Jaime Palomino
Claudio
Fecha: 2022.08.04
19:00:34 -05'00'

MSc. Ing. Jaime PALOMINO CLAUDIO
Jurado



Firmado digitalmente
por Mg. Ing. Johnny
Henry Ccatamayo
Barrios
Fecha: 2022.08.04
19:19:15 -05'00'

MSc. Ing. Johnny Henry CCATAMAYO BARRIOS
Jurado - Asesor



Firmado digitalmente
por ROBERTO JUAN
GUTIERREZ
PALOMINO

Mg. Ing. Roberto Juan GUTIÉRREZ PALOMINO
Jurado

Firmado
digitalmente por
LEZAMA CUELLAR
CHRISTIAN

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Secretario del Proceso

c.c.:
Bach. Danny Dayvis SOSA LOZANO
Jurados (4)
Archivo

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel 066 312510
Anexo 151



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 052-2022-FIMGC

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado en segunda instancia para las **Escuelas Profesionales** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH y Resolución Decanal N° 158-2021-FIMGC-UNSCH-D, deja constancia que Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : SOSA LOZANO, DANNY DAYVIS
Escuela Profesional : INGENIERÍA DE MINAS
Título de la Tesis : EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS EN LA MINA SAN VICENTE, 2022.
Evaluación de la Originalidad : 28 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 1876032029

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 27 de julio del 2022

Firmado digitalmente
por LEZAMA CUELLAR
CHRISTIAN

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
de la FIMGC

Con depósito para Sustentación y Tramite de Titulo

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS EN LA MINA SAN VICENTE, 2022.

por Danny Dayvis Sosa Lozano

Fecha de entrega: 27-jul-2022 09:52p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1876032029

Nombre del archivo: Tesis_DANNY_DAYVIS_SOSA_LOZANO_EPIM_ok.pdf (2.21M)

Total de palabras: 12434

Total de caracteres: 73789

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS EN LA MINA SAN VICENTE, 2022.

INFORME DE ORIGINALIDAD

28%

INDICE DE SIMILITUD

28%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es Fuente de Internet	15%
2	pt.scribd.com Fuente de Internet	4%
3	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1%
4	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
8	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	1%

9	Repositorio.Unsa.Edu.Pe Fuente de Internet	1 %
10	oa.upm.es Fuente de Internet	1 %
11	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	1 %
12	repository.eafit.edu.co Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
15	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	www.osinergmin.gob.pe Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

DEDICATORIA

Quiero expresar mi gratitud a Dios, a mi familia y por su apoyo emocional y económico en todo momento. Asimismo, por ser mi fuente de inspiración para lograr esta meta.

AGRADECIMIENTO

A mis queridos docentes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), quienes me brindaron los conocimientos y criterios necesarios para realizar trabajos en la industria minera.

A la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la UNSCH por haberme transmitido los conocimientos, experiencias y orientación vocacional para mi formación profesional como Ingeniero de Minas.

A la compañía minera San Vicente por haberme permitido realizar dentro de sus ambientes este trabajo de investigación.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por finalidad explicar de qué manera influye la evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas para el diseño de cámaras en la mina San Vicente. Para lo cual, se empleó una metodología aplicada de nivel explicativo. Así, se obtuvo las siguientes conclusiones: la información geológica y estructural de Mina San Vicente, con la cual se desarrolló el proyecto, es de buena calidad y confiabilidad. A partir de esta información, se concluyó en Mina San Vicente existen reconocidas ocho fallas mayores, además de fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas. Asimismo, el macizo rocoso de Mina San Vicente es de buena a regular calidad geotécnica. Los mecanismos de inestabilidad esperados para el proyecto son de dos tipos: Colapso o deslizamiento de bloques preformados limitados por estructuras y Derrumbe progresivo a caving asociado a zonas de menor calidad de macizo y zonas de fallas mayores.

Palabras claves: condiciones geológicas y geotécnicas, cámaras y pilares.

ABSTRAC

The purpose of this research work was to explain how the evaluation of geological and geotechnical conditions influences the design of chambers in the San Vicente mine. For which, an explanatory level application methodology was used. Thus, the following conclusions were obtained: the geological and structural information of Mina San Vicente, with which the project was developed, is of good quality and reliability. Based on this information, it was concluded that in Mina San Vicente there are eight recognized major faults, in addition to intermediate and minor faults and joint systems. Likewise, the rock mass of Mina San Vicente is of good to fair geotechnical quality. The instability mechanisms expected for the project are of two types: Collapse or sliding of preformed blocks limited by structures and Progressive collapse to caving associated with areas of lower solid quality and areas of major faults.

Key words: geological and geotechnical conditions, chambers and pillars.

Índice

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRAC.....	v
Índice de tablas	x
Índice de figuras	x
Introducción.....	1
Capítulo I.....	2
Planteamiento del Problema	2
1.1. Descripción de la realidad problemática	2
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema General	2
1.2.2. Problemas Específicos	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Justificación.....	4
1.5. Importancia.....	4
1.6. Hipótesis.....	4

1.6.1.	Hipótesis General.....	4
1.6.2.	Hipótesis Específico	4
1.7.	Variables e Indicadores	5
1.7.1.	Variable Dependiente	5
1.7.2.	Variable Independiente	5
Capítulo II.....		6
Marco Teórico		6
2.1.	Datos de la Unidad Minera.....	6
2.1.1.	Ubicación y acceso	6
2.1.2.	Marco Geológico	7
2.2.	Antecedentes de la investigación	10
2.3.	Bases Teóricas.....	13
2.3.1.	Parámetros geomecánicos.....	14
2.3.2.	Método de cámaras y pilares	27
2.4.	Definiciones conceptuales.....	30
Capítulo III		34
Metodología de la investigación.....		34
3.1.	Tipo de Investigación	34
3.2.	Nivel de Investigación.....	34
3.3.	Diseño.....	34

3.4.	Población.....	35
3.5.	Muestra.....	35
3.6.	Muestreo.....	35
3.7.	Metodología de trabajo.....	35
3.8.	Unidad de análisis	36
3.9.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	36
Capítulo IV		37
Recolección de datos y procedimiento experimental		37
4.1.	Modelo geotécnico	37
4.1.1.	Antecedentes geológicos.....	37
4.2.	Modelo estructural.....	38
4.2.1.	Modelo de fallas mayores	38
4.2.2.	Fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas	41
4.3.	Calidad de macizo rocoso	46
4.4.	Propiedades de la roca intacta y condición de esfuerzos	47
4.5.	Modelo geotécnico y mecanismos de inestabilidad	48
Capítulo V		51
Análisis de Resultados.....		51
4.1.	Análisis minero-geotécnico.....	51
4.1.1.	Dimensionamiento de unidades de explotación.....	51

4.1.2. Análisis de estabilidad y dimensionamiento de cámaras (Método de Mathews)	51
4.1.3. Análisis de estabilidad y dimensionamiento de cámaras (Método de Laubscher)	55
4.1.4. Dimensionamiento de pilares.....	57
5.2. Alertas geotécnicas.....	60
5.2.1. Análisis geométrico – estructural de fallas mayores	60
5.2.2. Análisis de fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas	62
5.3. Secuencia global de explotación	65
5.4. Proceso geotécnico y geotécnia de rutina	69
Conclusiones.....	72
Recomendaciones	75
Referencia bibliográfica	77

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen Fallas mayores identificadas Mina San Vicente.....	39
Tabla 2. Resumen sistema de fallas intermedias, menores y diaclasas dominantes Mina San Vicente.....	44
Tabla 3. Potenciales alertas definidas por fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas.....	62

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la Mina San Vicente.....	6
Figura 2. Estratigrafía.....	8
Figura 3. Ejemplos de mecanismos de falla y comportamiento del macizo rocoso para facilitar la comprensión del comportamiento del macizo rocoso.....	18
Figura 4. <i>Tipos de excavaciones mineras subterráneas.</i>	27
Figura 5. Classic room and pillar mining.....	28
Figura 6. Post room and pillar.....	29
Figura 7. Step room and pillar.....	30
Figura 9. Vista isométrica de modelo 3D de fallas mayores de Mina San Vicente.....	41
Figura 10. Mapeo estructural representativo de la mina, tomado de nivel 4.....	42
Figura 11. Estereonet mostrando sistemas de estructuras intermedias y menores dominantes.....	44
Figura 12. Perfil esquemático mostrando modelo geotécnico de mina San Vicente.....	49

Figura 13. Perfil esquemático mostrando potenciales mecanismos de inestabilidad esperados.	50
Figura 14. Gráfico del Método de estabilidad de Mathews.....	53
Figura 15. Factores de ajuste Método de Mathews.	54
Figura 16. Gráfica de estabilidad de Mathew.....	55
Figura 17. Representación de resultados obtenidos en la gráfica de Laubscher.	57
Figura 18. Gráfico de estabilidad de pilares de Lunder y Pakalnis (1997).	59
Figura 19. Vista esquemática de potencial colapso de pilar niveles 4 y 5 por falla FM04. .	61
Figura 20. Proyección estereográfica de sistemas dominantes y paredes de potenciales caserones.....	65
Figura 21. Vista en planta nivel 5. Ubicación pilar central entre niveles 4 y 5.....	67
Figura 22. Aumento de pilar niveles 4 y 5 por condición estructural.	68
Figura 23. Perfil longitudinal esquemático mostrando radios hidráulicos máximos y distribución de pilares.....	69
Figura 24. Diagrama proceso geotécnico.	70

Introducción

La investigación desarrolló un estudio orientado a determinar la condición geotécnica del proyecto de explotación subterránea de Mina San Vicente y a la vez, estimar parámetros de diseño que permitan dimensionar unidades de explotación estables.

El proyecto se llevó a cabo entre los meses de mayo y julio del presente año, y el trabajo para un adecuado estudio y presentación se ha estructurado en cinco capítulos que se describen a continuación:

El capítulo I se realiza la descripción problemática, se formulan los problemas generales y específicos, se plantean los objetivos y las justificaciones del proyecto.

El capítulo II hace una revisión literaria de los antecedentes referentes al tema a tratar, así mismo se detalla la conceptualización de los aspectos generales de los parámetros a utilizar en el desarrollo del proyecto.

El capítulo III explica los aspectos que involucran las metodologías utilizadas en el presente proyecto.

El capítulo IV muestran los procedimientos de cálculo para resolver las condiciones que requiere el proyecto.

El capítulo V muestra los resultados obtenidos.

Finalmente, en “Conclusiones y Recomendaciones” se reseñan las principales conclusiones y recomendaciones logradas en la presente tesis.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1.Descripción de la realidad problemática

El método de explotación de cámaras y pilares es utilizado universalmente en yacimientos tabulares sedimentarios, como pizarras cupríferas, yacimientos de hierro, carbón, potasio y otros. En el Perú, este método se aplica en la mina Condestable, San Vicente, Cerro de Pasco, Raura, Horizonte, Poderosa y otros. (Campos, 2019)

Asimismo, “el método de cámaras y pilares pertenece a la familia de métodos sin sostenimiento, que consiste en extraer mineral (metálico o no metálico) de las cámaras y sostenido con el mismo mineral a través de columnas o pilares. Su dimensionamiento está en función del tamaño del yacimiento”. (Campos, 2019).

Se aplican a yacimientos inclinados con un ángulo de inclinación de 20 a 45 grados, y consiste en ir dejando pilares a manera de columna de mineral, para mantener la cámara abierta. Las dimensiones de las cámaras y los pilares dependen de las características geomecánicas del mineral y del macizo rocoso, y también de la carga estática del espesor de las cajas y de las tensiones sobre la roca. Por ello, es relevante realizar la evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas para el diseño adecuado de las cámaras.

1.2.Formulación del problema

1.2.1. *Problema General*

¿De qué manera influye la evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas para el diseño de cámaras en la mina San Vicente, 2022?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1. ¿De qué manera la estructura geológica influye en el diseño de cámaras en la Mina San Vicente, 2022?

PE2. ¿Cómo influye la clasificación geomecánica y los mecanismos de inestabilidad en el diseño de cámaras, mina San Vicente, 2022?

PE3. ¿De qué manera se realizará el diseño y dimensionamiento de cámaras en las unidades de explotación en la Mina San Vicente, 2022?

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Explicar de qué manera influye la evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas para el diseño de cámaras en la mina San Vicente, 2022.

1.3.2. Objetivos Específicos

OE1. Detallar de qué manera la estructura geológica influye en el diseño de cámaras en la Mina San Vicente, 2022.

OE2. Determinar cómo influye la clasificación geomecánica y los mecanismos de inestabilidad en el diseño de cámaras, mina San Vicente, 2022

OE3. Detallar de qué manera se realizará el diseño y dimensionamiento de cámaras en las unidades de explotación en la Mina San Vicente, 2022.

1.4. Justificación

Las empresas mineras tienen como objetivo incrementar las ganancias reduciendo los costos. Es así, que el diseño de cámaras es una forma de explotación y extracción del mineral, que busca el soporte y seguridad durante la operación. Es por esta razón, que el presente estudio busca el diseño de cámaras a partir de las condiciones geológicas y geotécnicas en la mina San Vicente. Todo ello con la finalidad de recuperar el mineral y establecer un ambiente de trabajo seguro.

1.5. Importancia

La importancia de esta investigación radica en que contribuirá de manera significativa en el diseño de cámaras considerando las condiciones geológicas y geotécnicas de la mina San Vicente. Además, servirá como referencia para otros proyectos semejantes.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

La evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas influyen de manera preponderante para el diseño de cámaras en la mina San Vicente, 2022.

1.6.2. Hipótesis Específico

HE1. La estructura geológica influye significativamente en el diseño de cámaras en la Mina San Vicente, 2022.

HE2. La clasificación geomecánica y los mecanismos de inestabilidad influyen de manera directa en el diseño de cámaras, mina San Vicente, 2022

HE3. El diseño y dimensionamiento de cámaras en las unidades de explotación en la Mina San Vicente se realizan considerando las condiciones geológicas y geotécnicas.

1.7. Variables e Indicadores

1.7.1. Variable Dependiente

Diseño de cámaras

Indicadores

Dimensiones

Estabilidad

Fallas

1.7.2. Variable Independiente

Condiciones geológicas y geotécnicas

Indicadores

Estructura geológica

Clasificación geomecánica

Mecanismos de inestabilidad

Capítulo II

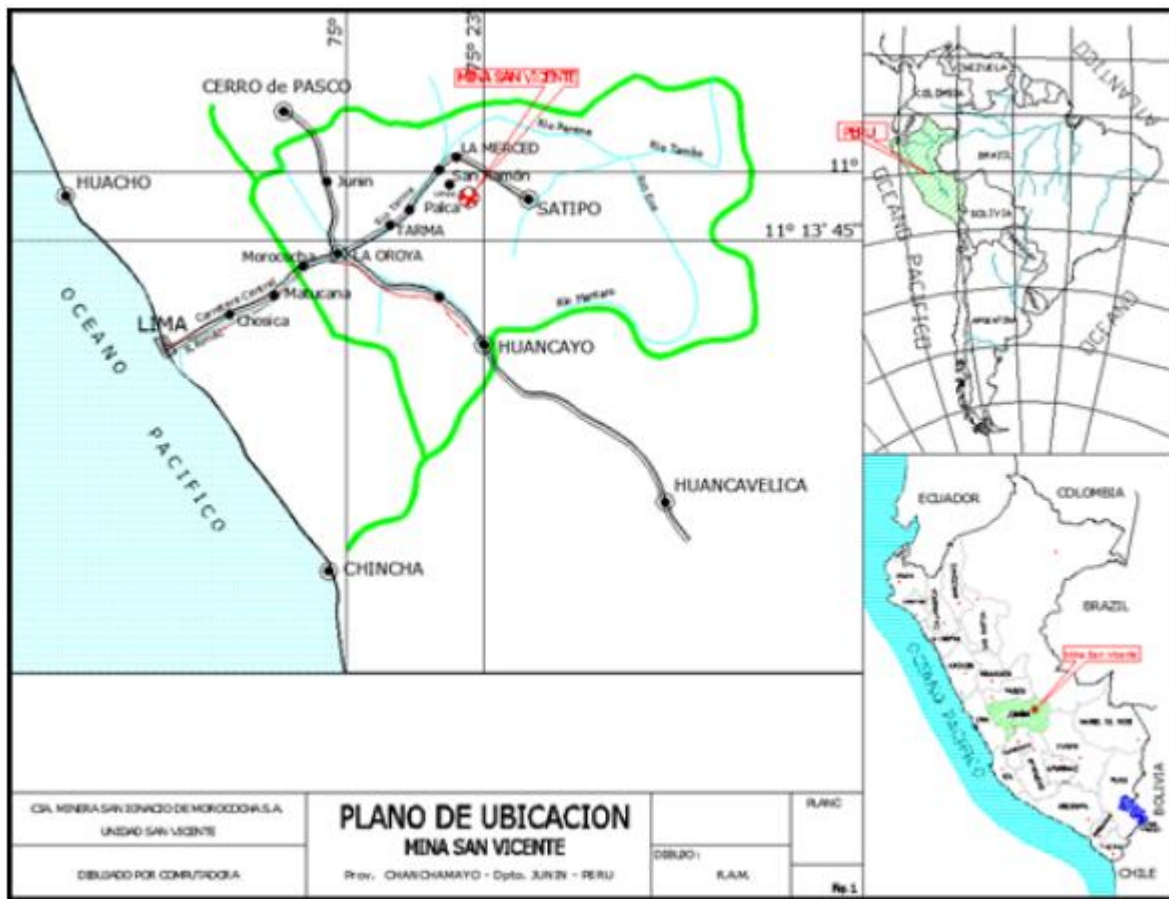
Marco Teórico

2.1. Datos de la Unidad Minera

2.1.1. Ubicación y acceso

La Mina San Vicente se ubica en el Distrito de Vitoc, Provincia de Chanchamayo, Departamento de Junín. Tiene las siguientes coordenadas UTM (WGS84-18S): 458,200E, 8'758'200N y una altitud que varía entre los 1,400 y 2,000 msnm. Ver Figura 1.

Figura 1. Ubicación de la Mina San Vicente.



El acceso es por la Carretera Central siguiendo la ruta Lima - La Oroya - Tarma - San Ramón hasta el Kilómetro 293 (antes de San Ramón), desde donde se sigue un desvío hacia el sur. Lima – La Oroya 188km, La Oroya – San Ramón 105 km, San Ramón – Mina San Vicente 17 km. Total 310 km.

2.1.2. Marco Geológico

2.1.2.1. Geomorfología.

“El área del proyecto se caracteriza por presentar un paisaje montañoso con relieves abruptos a terrenos bajos planos ondulados y con elevaciones desde 820 msnm hasta 3800 msnm. Se nota la presencia de quebradas pronunciadas que albergan y que muestran escarpes de fallas y planos de falla que dieron forma a estas”.

2.1.2.2. Geología Regional.

Regionalmente se ha establecido que el basamento rocoso metamórfico e intrusivo Paleozoico controló el desarrollo de altos estructurales y posiblemente la formación de barras oolíticas.

“Afloran rocas intrusivas antiguas del Paleozoico superior, representadas por el granito San Ramón al E y la granodiorita Tarma al W. Sobre estos intrusivos descansa la secuencia detrítica y volcánica del Grupo Mitu, del Pérmico, y sobre ella los sedimentos calcáreos con horizontes de mineralización de zinc y plomo del Grupo Pucará, del Triásico Superior-Jurásico Inferior”.

2.1.2.4. Geología Estructural.

En el área del Proyecto se aprecian 4 sistemas de fallas y fracturas, en el caso de las fallas estas en su mayoría se presentan cerradas sin una considerable potencia o aureola de perturbación y mostrando espejo de falla. Tanto en interior mina como en superficie se han identificado los siguientes sistemas:

“Sistema N - S: Como ejemplos de este sistema se tiene la falla Alicia al este de la mina que controla la sedimentación entre la mina Norte y quebrada Vilcapoma y la falla Solitaria al oeste de la mina”.

“Sistema E - W: Presenta alto buzamiento hacia el Norte, sus desplazamientos son normal-dextral”.

“Sistema NE - SW: Generalmente buza hacia el NW y su movimiento es dextral normal (<20°). Este sistema pertenece al lineamiento Puntayacu que es un conjunto de fallas con un ancho de más de 400 m de alcance”.

“Sistema NW - SE: Presentan alto buzamiento al SW. Las fallas 860 y 1220 son ejemplos de este sistema en interior mina”.

2.1.2.5. Geología Económica.

“San Vicente es un yacimiento del tipo Mississippi Valley estratoligado con mineralización de Zinc y Plomo. La mineralogía ganga está representada por dolomita (carbonato de calcio y magnesio) y en cantidades menores calcita”.

El área mineralizada tiene una longitud de 11 Km. entre las zonas de San Vicente (Norte y Sur), Uncush Sur, Siete Jeringas y Chilpes, a lo largo de la cual se encuentran

afloramientos a manera de lentes irregulares tanto en sentido horizontal como vertical. La mineralización se presenta en las siguientes formas:

“Tipo Cebra: Presenta textura bandeada conteniendo principalmente a la esfalerita de color marrón-grisamarilla, etc., de cristalización fina no ferrífera (blenda rubia); la galena es errática, compacta a finamente cristalizada con diseminaciones de pirita fina. El ancho horizontal de los mantos mineralizados varía de 1m a 20 m. La estructura 'Cebra' consiste en venas paralelas de esfalerita y dolomita, generalmente es paralela a la secuencia sedimentaria”.

Tipo Brecha: Presenta esfalerita masiva, esfalerita bandeada y dolomita como fragmentos angulosos, cementados con venas de calcita y/o dolomita.

“Tipo Masivo: Presenta esfalerita de grano fino distribuida en pequeños lentes, compacto con dolomita gris clara recristalizada, este tipo de mineralización está ligada a mantos de gran potencia y con alto contenido de Zinc”.

2.2. Antecedentes de la investigación

Tesis

Cañas (2018), en la investigación “Caracterización geológica y geomecánica de la mina San Joaquín, para el diseño de explotación por el método de cámaras y pilares”, tuvo como objetivo diseñar la explotación subterránea de carbón por el método de cámaras y pilares en la mina San Joaquín, perteneciente a la empresa Carbones San Fernando S.A.S. Para ello, se empleó la caracterización geológica y geomecánica del macizo rocoso. Concluyendo que el dimensionamiento de la disposición minera y especialmente de los

pilares está influenciado directamente por las condiciones geológicas, geomecánicas y estructurales del macizo rocoso.

Medina (2017), en la tesis “Diseño de cámaras y pilares basado en las características geomecánicas del macizo rocoso en la Corporación Minera Ananea S.A. – 2016”, tuvo como objetivo diseñar cámaras y pilares mediante las características geomecánicas del macizo rocoso y recursos minerales en la Corporación Minera Ananea. Para ello, empleó una investigación experimental y documental con un nivel descriptivo y analítico. Concluyendo que la dimensión de cámaras es de 4.5 metros de ancho y los pilares de 2 metros de ancho en los de forma cuadrada La resistencia de los pilares cuadrados es de 4.78 MPa.

Paye (2018), en la tesis “Influencia de los modelos geológico y geotécnico en el diseño de labores de desarrollo y preparación de la mina españolita Caraveli – Arequipa”, tuvo como objetivo elaborar el modelo geológico y geotécnico que contribuirá directamente al diseño de las labores de desarrollo y preparación y planificación de la profundización de la mina Españolita de Caraveli – Arequipa. Concluyendo que la elaboración del modelo geológico ha permitido el incremento de las reservas por debajo de los niveles de explotación actuales, y el mapeo geotécnico estructural ha permitido caracterizar el macizo rocoso a través de la elaboración de los estereogramas y el plano estructural.

Valentin (2019), en la tesis “Diseño geomecanico en el tajeo por subniveles con pilares corridos - mina Marcapunta Norte - Colquijirca”, tuvo como objetivo determinar las dimensiones de los tajeos en la mina Marcapunta Norte. Para ello, se empleó una investigación exploratorio, descriptivo y explicativo. Concluyendo que de los análisis realizados se desprende que es factible adoptar el método de minado “Tajeo por Subniveles con Pilares Corridos” de 10 metros de ancho para los blocks A, B y C y cámaras de 10 metros

de ancho, y para el block D los pilares corridos tienen un ancho de 8 metros y cámaras de 7 metros, esto debido a que se tiene laboreo antiguo en la parte superior y se debe continuar minado en la base inferior respetando el eje de los pilares.

Velazco (2021), en su tesis “Caracterización geo mecánica de las cámaras y pilares en la explotación del depósito de Au tipo manto para medir el dimensionamiento de sus labores en una mina artesanal del sector de Ananea Puno. Caso de estudio”, tuvo como objetivo realizar el dimensionamiento geo mecánico de cámaras y pilares para mejorar extracción y mejorar la productividad en las operaciones mineras en momentos que los precios de los metales se encuentran en una coyuntura favorable por la demanda internacional. Concluyendo que a través de la evaluación geomecánica en la zona de estudio se tiene un yacimiento y su formación geológica en la que están íntimamente relacionados a la mecánica de rocas y la geología en la que se pone mucha atención a la ingeniería y evaluación de la masa rocosa donde se establece el reglamento de seguridad y salud ocupacional.

Artículo de investigación

Castro et al. (2019), en la investigación “Diseño geotécnico de pilares en minas subterráneas de vetas auríferas en casos de Colombia”, tuvo como objetivo presentar un método empírico- analítico para el diseño de pilares de rocas en la minería subterránea de vetas auríferas en Colombia, que parte de la observación de casos en algunas de las condiciones geológicas de mayor producción en el país y otras experiencias internacionales. Concluyendo que es necesario que las personas encargadas de las explotaciones mineras desarrollen métodos de diseño de pilares propios de cada yacimiento.

2.3.Bases Teóricas

2.3.1. Condiciones de la masa rocosa según el tipo de fracturamiento.

Según, Rodríguez , C., (2015), “del Centro de capacitación Internacional (CCI), de Geotecnia y geomecánica, menciona que de acuerdo a las condiciones geoestructurales del macizo rocoso para el mapeo geomecánico de GSI de Hoek and Brown se puede denominar de la siguiente manera”:

- Roca masiva o levemente fracturada (LF)
- Roca moderadamente fracturada(F)
- Roca muy fracturada (MF)
- Roca triturada o brechada (T)
- Roca intensamente fracturada (IF).

2.3.1.1.Proyecciones estereográficas

Superficies como polos y círculos máximos.

Según, (Valencia Ch, 2010), “en curso Geomecánica en Compañía Minera Agregados Calcáreos. En el tratamiento de problemas de estabilidad en masas rocosas, deberá por una parte determinarse y representarse la situación en el espacio de las estructuras y los planos, por otra parte, debe ser tenida en cuenta la influencia de las estructuras de una manera cuantitativa en relación con posibilidades de movimiento y equilibrio limite. La representación de superficies o direcciones geológicas y la consideración de sus intersecciones son posibles mediante la Esfera de Proyección” Superficies como Polos y

Círculos máximos. Este procedimiento fue introducido inicialmente en geología por Schmidt, Sunder, Muller, Friedman y Philips.

El estado más avanzado de este desarrollo está contenido en uno de los trabajos de Hoek&Bray Parámetros geomecánicos.

Aplicación a estudios geológicos-estructurales.

Según, (Valencia Ch, 2010). “Es importante en mecánica de rocas conocer la situación y orientación de las discontinuidades y fracturas que, formando un sistema, persisten bajo unas mismas condiciones en un macizo rocoso. De aquí la necesidad de llevar a cabo un análisis detallado de las discontinuidades que será fundamental en la obtención de conclusiones. Para determinar un set o familia de fracturas se sigue el siguiente proceso”:

- Construcción del diagrama estereográfico con un número de datos de fracturas no inferior a 100.
- Trazado de líneas de isoconcentraciones de puntos para intervalos discretos en tanto por ciento del número total de puntos representados.
- Determinar que fracturas pertenecen o no a un set, para lo cual se sigue los siguientes criterios.
- Se estima un punto central de una concentración de polos en la red.
- Establecer un rango de más menos 20 grados en dirección de buzamiento y buzamiento.
- Se estima una media estadística para determinar la orientación promedio de los sistemas de fracturamiento.

- Un set es considerado como tal cuando recoge al menos 5% de los datos de fracturas.

“Es preciso construir un diagrama estereográfico para el total de fracturas medidas con miras a tener una idea del agrupamiento o dispersión de los datos a fin de estudiar la persistencia de los sets a lo largo de toda la zona de estudio. Se debe tener en cuenta lo siguiente”:

- Polo: representación de una orientación.
- Circulo máximo: representación de una superficie de corte.

2.3.1.2. Dominios geomecánicos.

2.3.1.2.1. Modelo geomecánico.

La construcción de un modelo geomecánica es el primer paso fundamental antes de iniciar las labores subterráneas, ya que describe todos los aspectos geomecánicos (geológico, estructural, macizo rocoso, hidrogeológico y condiciones de esfuerzos) sobre las características del entorno donde se va a llevar a cabo las labores subterráneas. A continuación, se detalla cada uno de ellos:

- **Modelo geológico**

Este modelo “debe representar la distribución de los materiales involucrados en el desarrollo de las labores mineras” (Osinergmin, 2017, p. 42). Asimismo, los tipos de materiales no solo deben considerar a la litología, sino también el grado y tipo de alteración u otros parámetros geológicos que podrían modificar de manera negativa o positiva el macizo rocoso.

Por otra parte, es importante identificar las características morfológicas, geológicas y la génesis de la mineralización, como también este modelo debe de estar enfocado en la geología global (roca encajonante y estructura mineralizada).

- **Modelo estructural**

Este modelo considera dos niveles: estructuras mayores e intermedias y estructuras menores. El primero es más continuo, aunque relativamente espaciadas y en la mayoría de los casos está constituido por material alterado, que influye de manera preponderante en la estabilidad de las labores. El segundo tiene continuidad limitada y son muy poco espaciadas, ello afecta en la estabilidad de las labores al igual que las estructuras mayores.

- **Modelo de macizo rocoso**

Este modelo está constituido por los siguientes análisis: a) propiedades de la roca intacta, b) índice RQD, c) clasificación geomecánica, d) resistencia de las estructuras menores y mayores, y e) propiedades de resistencia del macizo rocoso. Siendo así, que este método debe determinar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso que será empleada en el análisis y diseño de labores subterráneas. (Osinermin, 2017)

- **Modelo hidrogeológico**

Este método permite identificar la posible infiltración de agua en la mina. Así, permite evaluar los potenciales efectos de las aguas sobre la estabilidad de una mina subterránea. Es así, que se debe incluir en la evaluación los siguientes aspectos: a) infiltraciones que afectarían a las operaciones mineras, b) campo de presión de poros que afectarían en la profundización de la mina, y c) potencial ocurrencia de infiltraciones súbitas de agua a la mina subterránea.

- **Condiciones de esfuerzos**

La evaluación del estado de esfuerzos es importante, ya que los esfuerzos inducidos pueden dar origen a las concentraciones de esfuerzos que causan la inestabilidad local y global del macizo rocoso.

2.3.1.2.2. Dominios geomecánicos.

Los dominios geomecánicos se establecen después de haberse construido el modelo geomecánico y luego subdividirlo en zonas denominadas considerando características similares u homogéneas. Estos están asociados a las características geológicas del lugar y a los mecanismos de falla esperados para cada sector.

2.3.1.2.3. Mecanismos de falla.

La estabilidad de las excavaciones mineras depende del macizo rocoso, estructuras y los esfuerzos presentes.









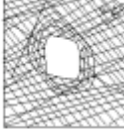
- **Mecanismos de falla controlada por esfuerzos**

La influencia de los esfuerzos en una excavación minera depende de la magnitud y orientación de los esfuerzos, dimensiones de las excavaciones y tipo o calidad de macizo rocoso.

- **Mecanismos de falla controlada por estructuras**

Una excavación minera a poca profundidad está influenciada por los sistemas estructurales del macizo rocoso. Es así, que a medida que el minado se profundiza y las excavaciones aumentan originan zonas de fallamiento por sobreesfuerzo.

Figura 3. Ejemplos de mecanismos de falla y comportamiento del macizo rocoso para facilitar la comprensión del comportamiento del macizo rocoso.

	Mesivo (RMR>75)	Moderadamente fracturada (50>RMR<75)	Altamente fracturada (RMR<50)
Esfuerzos in situ bajos	 Respuesta elástica lineal	 Deslizamiento o caída de bloques y cuñas	 Desplazamiento de bloques de la superficie de la excavación
Esfuerzos in situ intermedios	 Falla rígida adyacente al contorno de la excavación	 Falla rígida localizada de roca intacta y movimiento de bloques	 Falla rígida de roca intacta y desplazamiento a lo largo de las discontinuidades
Esfuerzos in situ altos	 Falla rígida alrededor de la excavación	 Falla rígida de roca intacta alrededor de la excavación y movimiento de bloques	 Roca deformable, comportamiento plástico

Fuente: Osinergmin

2.3.1.3. Criterios geomecánicos.

2.3.1.3.1. Criterios geomecánicos.

Los criterios geomecánicos a considerarse al llevar a cabo un proyecto minero son los siguientes: a) Criterios geomecánicos para el diseño (uso de la excavación minera, factor de seguridad y/o probabilidad de falla, área de influencia y normas técnicas aplicables), b) Criterios geomecánicos durante la construcción y operación (estándares constructivos, especificaciones técnicas, técnicas de construcción y explotación, mapeo, instrumentación y

monitoreo), y c) Criterios geomecánicos para el cierre de minas (durabilidad, monitoreo y mantenimiento).

2.3.1.3.2. Criterios de aceptación.

- **Factor de seguridad**

El factor de seguridad “es una medición determinista de la relación entre las fuerzas resistentes (capacidad) y las fuerzas actuantes (demanda)” (Osinergmin, 2017, p. 46). Así, el factor de seguridad (FS) de una estructura se determina a través de lo siguiente:

$$FS = \frac{C}{D}$$

Donde:

FS = Factor de Seguridad.

C = Capacidad de soporte de carga del sistema.

D = Fuerzas actuantes o demanda sobre el sistema.

- **Probabilidad de falla**

La probabilidad de falla (PF) “es una aproximación mayormente utilizada para dar una evaluación más racional del riesgo asociado a un diseño particular” (Osinergmin, 2017, p. 47). Asimismo, la probabilidad de falla es una función, no solo de promedios sino también de variabilidad de los datos de entrada.

Es así, que posee las siguientes características:

- Son complejos.

- Sus propiedades son raramente bien conocidas.
- Sus propiedades son muy variables en espacio y en tiempo.
- Las fuerzas actuantes sobre el sistema pueden ser complejas.

Cabe mencionar que existen dos opciones de uso de la probabilidad de falla: a) La opción 1 reconoce al FS como una variable al azar y busca la probabilidad de ser igual o menor que 1:

$$PF = P(FS) \leq 1$$

b) La opción 2 busca la probabilidad que la demanda (D) exceda la capacidad (C):

$$PF = P(C - D) \leq 0$$

2.3.1.4. Diseño geomecánico del método de minado.

2.3.1.4.1. Factores característicos del diseño geomecánico.

Un yacimiento de mineral puede ser explotado por diferentes métodos, y por ello la selección del método y diseño de explotación subterránea debe ser de acuerdo a las características de un tipo de yacimiento: a) configuración geométrica (dimensiones y forma), b) disposición y orientación (profundidad, buzamiento y rumbo), c) tamaño (masivo, tabular o veta), d) Características geomecánicas (mineral y roca encajonante), e) distribución de ley (uniforme, variable, irregular), y f) aspectos ambientales.

Asimismo, las características geomecánicas del mineral y la roca encajonante influyen de la siguiente manera: a) selección del método de minado, b) dimensionamiento de aberturas y pilares, c) mecanización de las operaciones unitarias, d) sistema de sostenimiento,

e) diseño de la estructura de mina, f) dimensionamiento de labores de desarrollo, preparación y producción, g) capacidad de producción, h) selección del equipo apropiado, y f) control y manejo del equilibrio del macizo rocoso luego de la explotación.

2.3.1.4.2. Métodos de explotación subterránea.

Los métodos de explotación en minas subterráneas se dividen en tres categorías, las cuales son los siguientes:

- **Métodos sin soporte o hundimiento**

En este método “los vacíos creados por la extracción del mineral se rellenan progresivamente con el material del hundimiento de la caja techo a medida que se siga minando” (Osinermin, 2017, p. 50). Asimismo, se divide en dos: hundimiento por bloques (el cuerpo mineral es preparado para inducir a la inestabilidad del mineral y al ser este extraído por las labores inferiores por encima de los bloques se hunde gradualmente) y hundimiento por subniveles (la caja techo se hunde progresivamente para rellena los espacios vacíos originados por la extracción del mineral).

- **Métodos soportados por pilares**

En estos métodos “se dejan pilares de macizo rocoso o mineral como principal forma de controlar la estabilidad de áreas extraídas” (Osinermin, 2017, p. 50). Asimismo, existen dos tipos: método de cámaras y pilares (el mineral es extraído de las cámaras y los pilares son dejados entre las cámaras como soporte para controlar la estabilidad), y tajeos por subniveles con cámaras abiertas (los pilares de soporte son los pilares corona y pilares costilla que se dejan en mineral para controlar la estabilidad de la roca encajonante).

- **Métodos artificialmente soportados**

Como es de conocimiento que la exploración subterránea llega a niveles profundos de la mina y que ello genera mayor inestabilidad, y surge la necesidad de un sistema de relleno eficiente. Es así, que este último es aplicable a métodos artificialmente soportados. Entre ellos se puede mencionar a los métodos de almacenamiento provisional.

2.3.1.4.3. Métodos de explotación según exposición de personal.

El diseño de excavaciones considerando la entrada del personal o no en la mina contribuye a reducir los riesgos de caída de rocas. Es así, que, desde el nivel de riesgo del personal en el proceso de minado, los métodos de explotación se dividen en dos:

- **Métodos sin entrada de personal**

Este método realiza el proceso de explotación sin presencia del personal dentro de los tajeos, y la extracción se realiza con equipos de control y telemando. Es así, que los métodos de explotación que se encuentran dentro de este grupo son: tajeos abiertos (*Open stoping*), tajeos por subniveles (*Sub level stoping*), hundimiento por subniveles (*Sub level caving*), y hundimiento de bloques (*Block caving*).

- **Métodos con entrada de personal**

Se realiza la explotación minera con presencia del personal dentro de los tajeos, siendo así que en este proceso se debe considerar la estabilidad del macizo rocoso y la seguridad del personal. Los métodos de explotación que se encuentran dentro de este grupo son: almacenamiento provisional (*Shrinkage*), corte y relleno (*Cut and fill*), y cámaras y pilares (*Room and pillars*).

2.3.1.4.4. Tipos de excavaciones subterráneas según su uso.

Las excavaciones mineras subterráneas en función de la vida útil han sido divididas en dos grandes categorías:

- **Excavaciones mineras permanentes**

En este tipo de excavaciones, el personal estará transitando durante gran parte de la vida de la mina y las labores deben cumplirse con todas las especificaciones técnicas de diseño y construcción para un lapso de tiempo que supere o se aproxime a la duración de la actividad minera.

- **Excavaciones mineras temporales**

Las labores mineras temporales son “las excavaciones que forman parte de la infraestructura de explotación de un bloque mineral, siendo excavadas para el corto plazo (menor a 3 meses) o mediano plazo (menor a un año)” (Osinergmin, 2017, p. 53). Estas labores son menos riesgosas y el personal transitará y se expondrá dentro de estas labores hasta que finalice la explotación del tajo.

2.3.1.4.5. Resistencia del pilar

Según, Salazar Eder, Córdova R. David (2013), “explica que para la estimación de la resistencia de los pilares (S), se ha utilizado el criterio de Lunder y Pakalnis (1997). En base a una gran data de observaciones de comportamientos de pilares en minas canadienses en roca dura, estos autores propusieron un método de estimar la resistencia de los pilares integrando los resultados de la teoría del área tributaria y de un análisis de elementos de borde, lo cual define una fórmula de confinamiento en el pilar, que concilia las expresiones altamente empíricas de resistencia de los pilares con aquellas derivadas de principios más

rigurosos, basados en criterios convencionales de resistencia de la roca y el estado de esfuerzos y confinamiento que se desarrollan en un pilar”.

Según el criterio de Lunder y Pakalnis, la resistencia del pilar depende directamente de su tamaño y forma y de la resistencia de la roca intacta. La fórmula establecida es la siguiente:

$$s = (k * RCU)$$

- S = Resistencia de los Pilares (MPa)
- K = (kappa) es un término de fricción del pilar
- C_1 = Constante derivada empíricamente cuyo valor determinado es 0.68
- C_2 = Constante derivada empíricamente cuyo valor determinado es 0.52
- k = Es el factor del tamaño de la resistencia del macizo rocoso, determinado a un valor de 0.44. El valor de k también puede ser determinado con la siguiente fórmula:

$$k = \tan * \left[\left(\cos^{-1} \right) * \left(\frac{(1 - C_{pav})}{(1 + C_{pav})} \right) \right]$$

En la Tabla se muestra las constantes de diferentes autores para el diseño de pilares que nos sirve de ayuda para el cálculo de dimensión de pilares óptimos.

Figura 4. Constantes para el diseño de pilares.

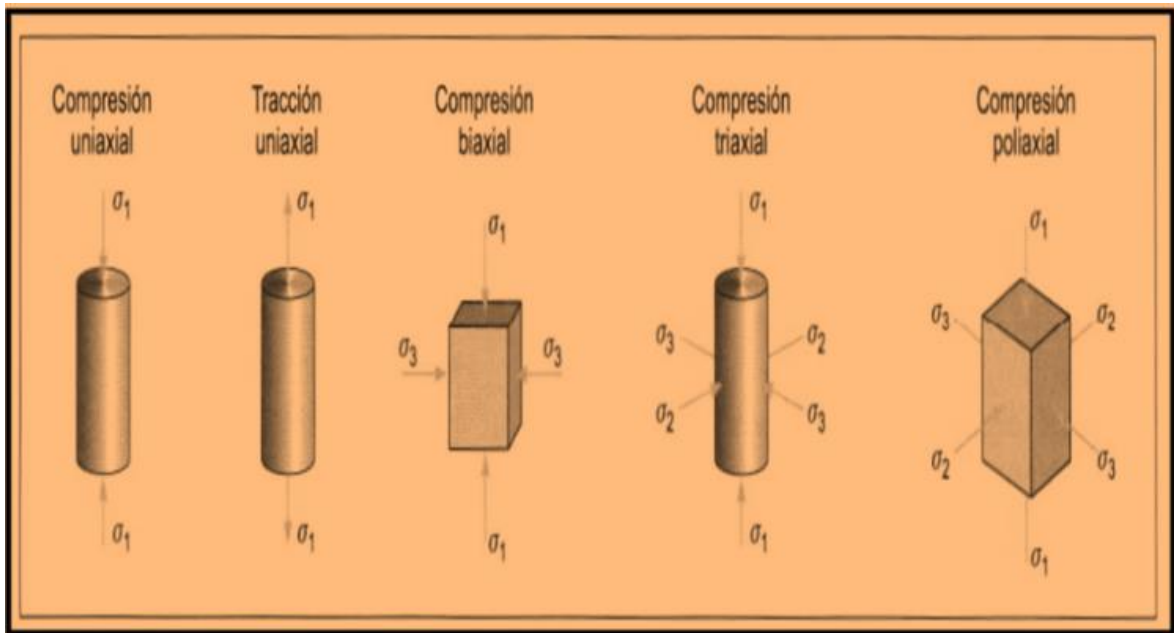
Fuentes	a	b	A	β
Buting (1911)	0,70	0,30	-	-
Obert & Duvall (1967)	0,78	0,22	-	-
Bieniawski (1968)	0,64	0,36	-	-
Skelly, Wolgamott & Wang (1977)	0,78	0,22	-	-
Greenwald, Howarth & Hartman (1939)	-	-	0,50	0,83
Holland (1964)	-	-	0,50	1
Salomón & Munro (1967)	-	-	0,46	0,66
Hardy & Agapito (1977)	-	-	0,60	0,95

Fuente: Brady & Brown, 2004

2.3.1.4.6. Esfuerzos, tensiones y deformaciones en las rocas

“Las rocas pueden estar sometidas a diversos esfuerzos y estados de tensiones, en condiciones naturales, un núcleo de roca intacta puede estar sometido a los esfuerzos como los mostrados en la figura 2.1 donde es el esfuerzo principal mayor y es el esfuerzo principal menor . Adicionalmente, también se encuentran sometidas a esfuerzos tangenciales t , ocasionados por la tracción entre las partículas de rocas o en las discontinuidades. Debido a que estos esfuerzos a los que se ven sometidos las rocas le ocasionan ciertas deformaciones que influyen directamente sobre sus propiedades mecánicas, es importante conocer las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones para poder predecir la magnitud de éstas. Uno de los aspectos más importantes que se debe conocer de un material rocoso es su resistencia a los esfuerzos a los que se ve sometido y las leyes que rigen su rotura y deformación”. (González de Vallejo & Ferrer, 2002).

Figura 5. Estados de tensiones aplicados a muestras de laboratorio



Fuente: González de Vallejo & Ferrer, (2002)

“Normalmente en labores donde se vean implicados esfuerzos el factor de seguridad puede alcanzar diferentes valores, cuyo rango va desde 1 (valor mínimo) e ir incrementándose según la complejidad de la obra. El riesgo implícito dentro de las labores de explotación en toda mina subterránea es muy elevado y ya que es indispensable garantizar el sostenimiento y la seguridad dentro de las mismas el factor de seguridad se inclina hacia un valor elevado. Debido a las razones antes expuestas para este trabajo se tomará la relación de resistencia y esfuerzo con un valor no menor a 1.5”.

Figura 6. *Tipos de excavaciones mineras subterráneas.*

Excavaciones mineras permanentes	Excavaciones mineras temporales
Rampas principales	Tajeos de explotación
Rampas	Galerías
Bypass	Subnivel de acceso
Chimeneas principales de ventilación	Crucero de acceso a tajeo local
Chimeneas principales de servicios	Crucero de extracción
Chimeneas <i>ore pass</i> principales	Cruceros de servicios (agua, aire, relleno, etc.)
Inclinados	Chimeneas o Slots de producción
Desarrollos del nivel principal	Chimeneas de ventilación de tajeos
Rutas de escape	Chimeneas de servicios de tajeos
Refugios	Chimeneas <i>ore pass</i> de tajeos, etc.
Cargaderos	
Áreas de oficinas y comedor	
Cámaras de refugio	
Salas de reuniones y/o monitoreo.	
Bodegas mineras	
Polvorines subterráneos	
Sub estaciones eléctricas	
Estaciones de primeros auxilios	
Excavaciones de chancado	
Estaciones de bombeo principal	
Áreas de talleres	
Estacionamiento vehicular, etc.	

Fuente: Osinergmin.

2.3.2. Método de cámaras y pilares

Este método de explotación es utilizado debido a su bajo costo de explotación. Asimismo, está pensado “para depósitos de tipo tabular horizontal o de ángulo de buzamiento bajo y de espesor limitado, como es el caso de algunos yacimientos de lutitas cupríferas, carbón, sal común, potasas, calizas, dolomitas, etc., dejando una o varias cavidades vacías, manteniendo el hueco creado estable” (Herrera, 2020, p. 19). También, este método implica

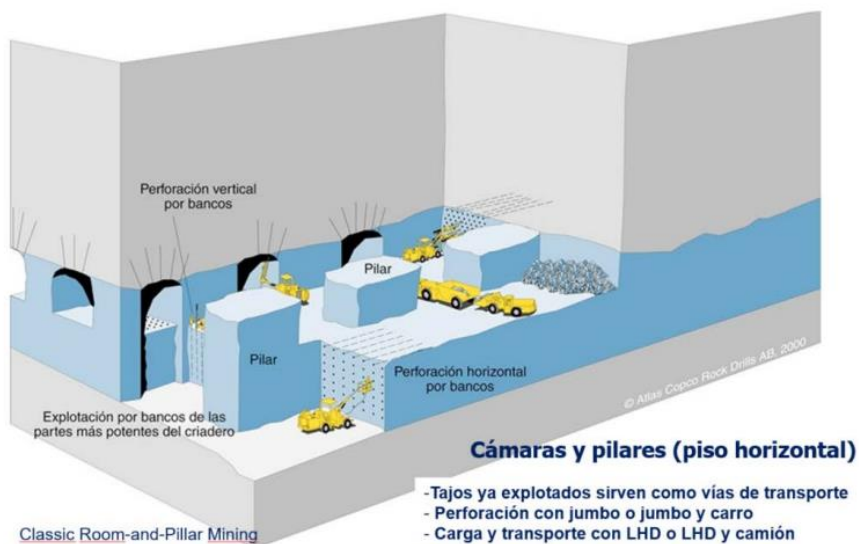
dejar pilares para el soporte del techo de las cámaras abiertas. Y permite hasta un 90% la recuperación satisfactoria del yacimiento.

2.3.2.1. Variantes del método

- Classic room and pillar mining

Esto se aplica en depósitos horizontales o subhorizontales. Y la extracción del mineral crea grandes huecos, donde las maquinarias puedan desplazarse fácilmente. Asimismo, “los cuerpos mineralizados con grandes alturas verticales se extraen en franjas horizontales comenzando por la parte superior y descendiendo de forma escalonada” (Herrera, 2020, p. 19).

Figura 7. Classic room and pillar mining.

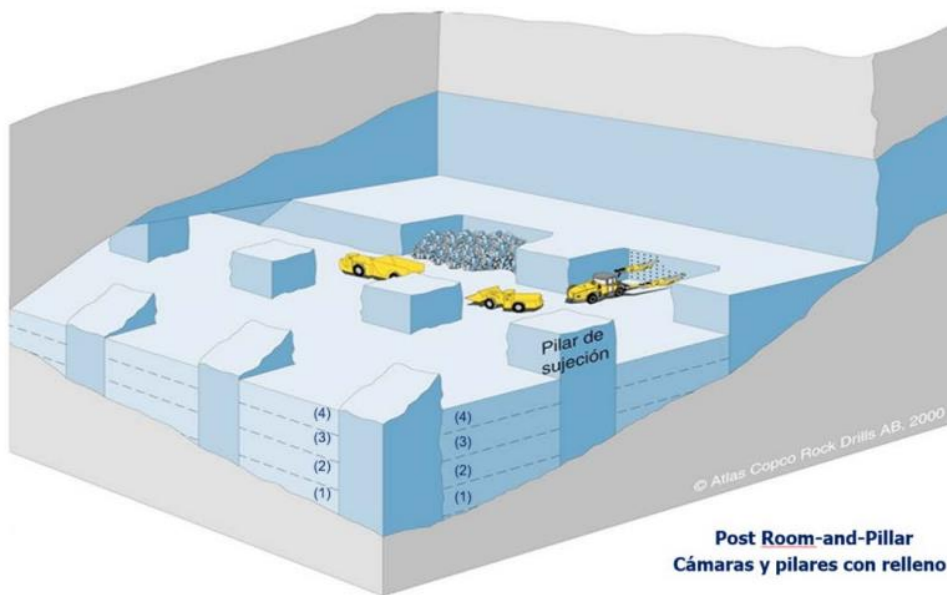


Fuente: Herrera (2020).

- Post room and pillar mining

Esta variante se aplica a yacimientos tabulares inclinados con ángulos de 20° a 55°. Y “trata de explotaciones donde las cámaras pueden alcanzar grandes alturas verticales, por lo que el hueco explotado se va rellenando secuencialmente para mantener estables los pilares y los huecos” (Herrera, 2020, p. 19). Asimismo, el propio relleno sirve para la circulación de la maquinaria.

Figura 8. Post room and pillar.

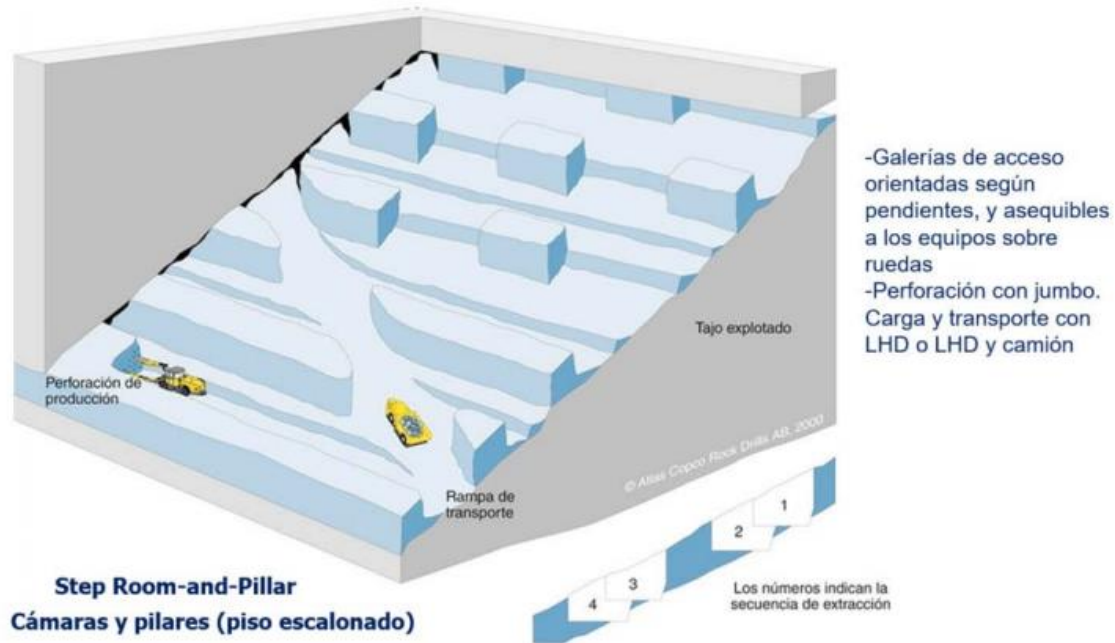


Fuente: Herrera (2020).

- **Step room and pillar mining**

Esta variante es empleada en el caso de que “el buzamiento del cuerpo mineralizado o de la capa es demasiado alto como para permitir la libre circulación y operación de vehículos y maquinarias sobre neumáticos” (Herrera, 2020, pp. 19-20). En este tipo de explotaciones, en la mayoría de los casos, solo puede operar máquinas de perforación, arranque y carga sobre rueda.

Figura 9. Step room and pillar.



Fuente: Herrera (2020).

2.4. Definiciones conceptuales

Perforación

Acción o proceso de elaborar un orificio circular con un taladro (perforadora) manual o mecánico (eléctrico o hidráulico).

Discontinuidad

Cambio abrupto en las propiedades físicas de materiales adyacentes en el interior de la Tierra.

Estabilidad

Resistencia de una estructura, un talud o un muro de contención, a la falla por deslizamiento o colapso bajo condiciones normales, para las que fue diseñado.

Seguridad industrial

Conjunto de actividades dedicadas a identificación, evaluación y control de los factores de riesgo que pueden ocasionar accidentes de trabajo.

Energía interna

“La energía interna es la fuerza concentrada y almacenada en cualquier cuerpo, pudiendo convertirse en energía potencial. Para nuestros fines de estudio diremos que es la fuerza acumulada in-situ en el interior del macizo rocoso y que puede actuar violentamente al producirse una excavación subterránea”

Esfuerzos

“Son las fuerzas que aparecen inevitablemente alrededor de cualquier excavación subterránea y son las responsables de provocar los deslizamientos y desprendimientos de las rocas en una labor minera”.

Geomecánica

“Es la ciencia teórica y aplicada que se encarga del estudio del comportamiento mecánico de la roca y de las fuerzas inducidas como resultado de una excavación subterránea, dando una solución más favorable al problema de sostenimiento en las labores mineras”.

Discontinuidades

“También se le conoce comúnmente como rajadura, fractura o también juntas, conociendo bien este parámetro en una evaluación geomecánica se puede llegar a determinar la calidad de la masa rocosa”.

Falla

“Es una fractura que separa dos bloques de roca, pudiendo haber deslizamiento uno respecto del otro, estas fallas pueden estar rellenas con arcilla o elementos biológicos que se vierten desde la superficie de la tierra al hacer el movimiento tectónico de rocas”.

Sostenimiento

“Empleando los principales métodos de sostenimiento de mina como son. Pernos, Split set, enmallado, y cuadros de madera. Tiene como objeto mantener la estabilidad de la roca en todas las labores, siendo de suma importancia de trabajo ya que garantiza el desarrollo de todo tipo de actividades de la operación y la finalidad principal del sostenimiento que es evitar la caída de rocas, bancos o planchones del techo o laterales de la caja, es decir es el refuerzo que requiere una labor cuando las condiciones de inestabilidad y seguridad lo requieran. Para conseguir un buen sostenimiento es necesario una correcta indagación y evaluación del macizo rocoso a fin de elegir el correcto elemento de soporte”.

Desarrollo

El término de desarrollo en una mina se refiere a la exploración de mineral contenido en el yacimiento seleccionado. En general en el desarrollo de minas se ejecutan; labores con pendiente negativa que se constituye como rampa o inclinados. Y si es hacia arriba con un ángulo bastante pronunciado se llama chimenea y si es en sentido contrario se llama pique.

Preparación

La preparación de una mina es el definir el tipo de labores de acceso al yacimiento subterráneo ya que estas pueden iniciarse: con una galería, inclinado o rampa, se considera

la profundidad del yacimiento, tiempo disponible para la preparación, costo de operación y tipo de equipos para el transporte al exterior.

Explotación

La explotación se realiza en un yacimiento donde exista concentración de mineral, elemento o roca con suficiente valor económico como para sustentar el costo de operación, la explotación es un beneficio industrial para la empresa.

Meteorización

Denominada también intemperización, está relacionada con la modificación que sufre la superficie de la roca o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos. El grado de la meteorización dependerá de las condiciones climatológicas, morfológicas y la composición de la masa rocosa. La meteorización se divide en meteorización física, química y biológica.

Estabilidad Del verbo estabilizar; en minería, significa dar permanencia firme y constante a las excavaciones subterráneas y a los taludes de labores a cielo abierto. Se logra estabilidad en labores subterráneas, utilizando métodos de sostenimiento con soporte metálico, de madera o con relleno, con pernos, malla y otros elementos que fortifique la labor minera.

Estallido o reventazón de rocas

Es el desprendimiento súbito y violento de grandes bloques de roca como consecuencia de las grandes presiones ejercidas en el contorno de una excavación, generalmente ocurre a grandes profundidades. Los estallidos de rocas en las aberturas subterráneas, son el debilitamiento y desprendimiento violento de los bloques rocosos dentro de la excavación subterránea.

Capítulo III

Metodología de la investigación

3.1. Tipo de Investigación

Es tipo de investigación aplicativo que “tiene por objetivo la generación de conocimiento con aplicación directa y a mediano plazo en la sociedad o en el sector productivo” (Lozada, 2014, p. 35). Y presenta un gran valor agregado, ya que emplea el conocimiento empleado en la investigación básica.

Es así, que en esta investigación se busca evaluar las condiciones geológicas y geotécnicas para el diseño de cámaras en la Mina San Vicente.

3.2. Nivel de Investigación

El nivel de investigación es explicativo, ya que “intenta ir más allá de la investigación exploratoria y descriptiva para identificar las causas reales de un problema” (Abreu, 2012, p. 194). Por ello, en esta investigación se busca explicar la evaluación de las condiciones geológicas y geotécnicas para el diseño de cámaras en la Mina San Vicente.

3.3. Diseño

Es una investigación experimental de tipo cuasi experimental, que tiene como objetivo “poner a prueba una hipótesis causal manipulando (al menos) una variable independiente donde por razones logísticas o éticas no se puede asignar las unidades de investigación aleatoriamente a los grupos” (Fernández et al., 2014, p. 756). En esta

investigación la aplicación de las condiciones geotécnicas y geológicas va generar el diseño de cámaras en la Mina San Vicente.

3.4.Población

La población de estudio “es un conjunto de casos, definido, limitado y accesible, que formará el referente para la elección de la muestra que cumple con una serie de criterios predeterminados” (Arias et al., 2016, p. 201). La población de esta investigación está conformada por la mina San Vicente.

3.5.Muestra

La muestra es “un subconjunto o parte del universo o población en que se llevará a cabo la investigación” (López, 2004, p. 69). Siendo así, una parte representativa de la población. La muestra de la presente investigación son 8 fallas mayores encontrados en la mina San Vicente hasta la fecha del estudio.

3.6.Muestreo

El muestreo es “el método utilizado para seleccionar a los componentes de la muestra del total de la población” (López, 2004, p. 69). De esta manera, el muestro empleado para esta investigación es no probabilístico de tipo intencional.

3.7.Metodología de trabajo

Para desarrollar el estudio, se implementó una metodología de trabajo que incorporó las siguientes etapas:

- Recopilación de información existente, provista por Minera San Vicente.

- Generación de modelo geotécnico conceptual de la mina a partir de la información existente.
- Validación en terreno de condición estructural y geotécnica de la mina.
- Estimación de parámetros de diseño (dimensiones estables de las cámaras) mediante el uso de técnicas empíricas.
- Dimensionamiento de placas y pilares mediante aplicación de técnicas empíricas.
- Generación de recomendación de secuencia de explotación, control, rutina y mediano plazo.

3.8.Unidad de análisis

La unidad de análisis de la presente investigación son las cámaras, que son diseñados a partir de condiciones geotécnicas y geológicas.

3.9.Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

- Observación: Esta técnica se empleó para describir aspectos generales relacionados a la mina y el nivel de operación.
- Registro de datos de campo: Al tener la muestra seleccionada se toman datos de campo usando fichas de bases de datos.
- Análisis de datos: Se realiza el análisis de los aspectos geológicos y geotécnicos que intervienen en el diseño de las cámaras en la mina San Vicente.

Capítulo IV

Recolección de datos y procedimiento experimental

4.1. Modelo geotécnico

4.1.1. *Antecedentes geológicos*

La Mina San Vicente, se encuentra geológicamente emplazada en rocas volcánicas de la Formación

Tuina (Carbonífero – Pérmico?), y que corresponde a secuencias de rocas volcánicas epiclásticas, con intercalaciones de lavas andesíticas, tobas y algunas intercalaciones de areniscas. En el área, los paquetes volcánicos se encuentran plegados. Específicamente en la zona de explotación, se ha reconocido una estratificación dada por planos con orientación N 20° - 50° W / 25° - 65° NE sin embargo, es posible que se presente variabilidad en la mina, pues en el entorno al yacimiento, se observan plegamientos de las secuencias.

La mineralización se encuentra asociada a un cuerpo tipo veta, en algunos sectores con evidencias de brechización, y cuya disposición es N 70° W, subvertical. Los contactos del cuerpo mineralizado se pueden describir como discontinuos, especialmente en la parte norte del cuerpo. Hacia el sur, los contactos entre la mineralización y la roca de caja son más tajantes, y en general asociados a discontinuidades o planos de debilidad. La mineralización se presenta en venillas, pátinas, diseminada y en stockwork, y varía de bornita, calcosina con bordes de calcopirita, a zonas donde sólo se reconoce calcosina, bornita y mixtos, y sectores

con cobre nativo. De acuerdo a los antecedentes provistos por Minera Antares, y a discusiones técnicas con geólogo de la empresa, el origen del depósito no estaría resuelto.

4.2. Modelo estructural

A partir de la información de mapeos realizados por geólogo de la mina, y validaciones realizadas por EMT, se puede concluir que en la mina existen fallas de tipo mayores (reconocidas en distintos niveles de la mina, con continuidad en la horizontal, con presencia de salbanda, espesores mayores a 10 centímetros y halos de fracturamiento asociados). También se identifican fallas intermedias y menores, las cuales se presentan con mayor persistencia, menor continuidad y espesores menores a 10 centímetros. Además se identifican sistemas de discontinuidades menores, tanto como familias de diaclasas y fracturas, que en general son cortos y rugosos.

4.2.1. Modelo de fallas mayores

Las fallas mayores son individualizables, y deben ser tratadas en forma particular. Se les debe hacer permanente seguimiento y actualizar la información cada vez que aparezcan nuevos antecedentes. En Tabla 1 se muestra un resumen de las ocho fallas mayores reconocidas hasta la fecha del estudio en la mina. Para efectos del presente estudio, fueron denominadas en forma numérica, sin embargo, resulta de mucha utilidad para hacerles seguimiento, identificarlas con nombre propios.

Tabla 1. Resumen Fallas mayores identificadas Mina San Vicente.

(ID) NOMBRE FALLA	RUMBO	MANTEO	CARACTERÍSTICAS
FM01	N 30° W	35° - 45° E	Falla con 10 a 40 centímetros de espesor de salbanda (de tipo brecha de falla, óxidos de fierro y arcillas). Presenta un halo de roca fracturada de 1 metros en ambos bloques. En bloque yacente, fracturamiento paralelo a falla. En bloque pendiente, fracturamiento más irregular y heterogéneo.
FM02	N 20° W	35° E	Falla con 15 centímetros de espesor, y halo fracturado menor de 50 centímetros. Continuidad poco clarificada.
FM03	N 33° - 38° W	40° E	Falla con 10 a 30 centímetros de espesor de salbanda (de tipo brecha de falla, óxidos de fierro y óxidos de cobre). Presenta un halo deroca fracturada de 1 metros total. En nivel 4 se observa ramificada.
FM03_RAMA	N 35° W	40° E	Falla que de acuerdo a los actuales antecedentes, sería una ramificación de falla FM03.

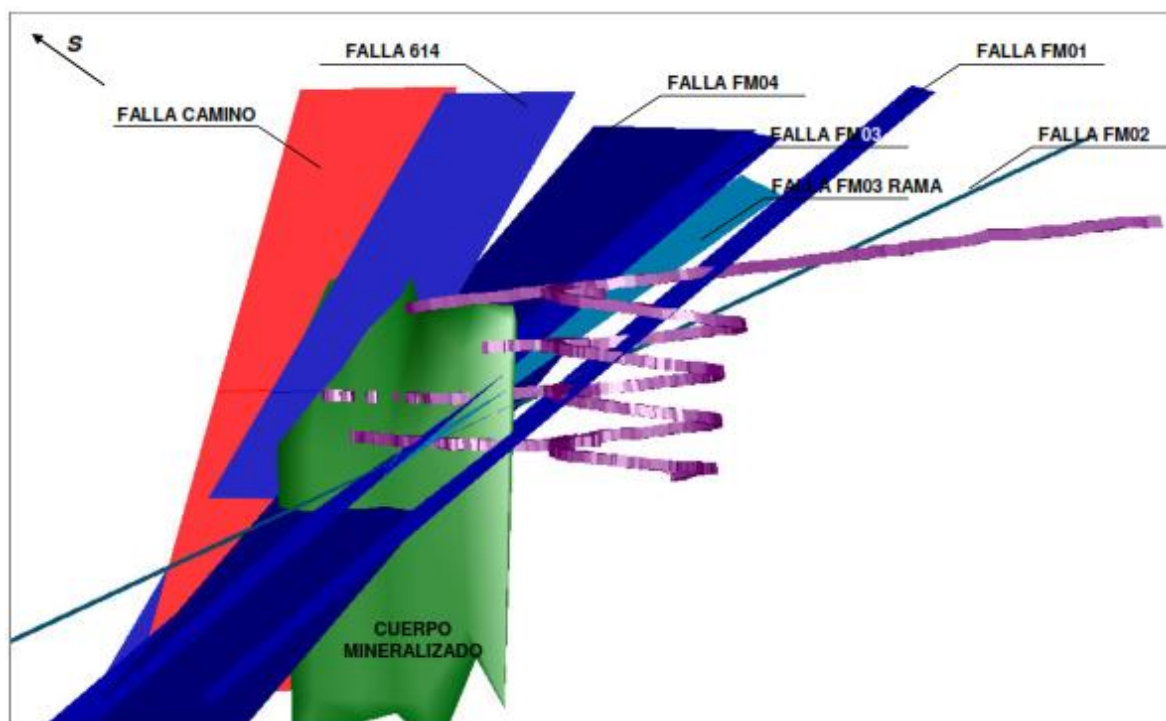
614	N 20° - 30° E	40° - 50° E	Falla con 20 a 40 centímetros de espesor de salbanda (brecha de falla, óxidos de fierro y cobre). Halo fracturado de 1.5 a 2 metros.
CAMINO	N 30° - 35° E	60° - 70° E	Falla de tipo regional, con hasta 1 metro de espesor de salbanda (arcillas y óxidos de fierro). Halo fracturado hasta 4 metros y alta alteración.
FM04	N 65° W	40° NE	Falla con espesores irregulares, siendo los más representativos de 20 a 40 centímetros y halos fracturados de hasta 1 metro en ambos bloques (pendiente y yacente)
FM05	N 40° W	75° NE	Falla con espesores variables entre 20 y 50 centímetros, con 2 metros de halo fracturado. Sólo ha sido reconocida en nivel 5, por lo que requiere atención y seguimiento para confirmar continuidad

Lo ideal para el tratamiento y evaluación del impacto de estas estructuras, es manejarlas en forma 3D, ya sea con plantas y perfiles o modeladas en software de manejo gráfico 3D, lo que permite una rápida y fácil visualización de su proyección a cualquier cota o en cualquier dirección.

La Figura 9 muestra un ejercicio preliminar realizado para forma 3D las actuales fallas mayores reconocidas. Es importante destacar que el ejercicio realizado es sólo

conceptual, pues el nivel de información disponible a la fecha de cada falla mayor es pobre (reconocidas a lo más en dos niveles). Es por esta razón, que las superficies modeladas se visualizan rectas y planas, condición que geológicamente es poco real. Por lo mismo, resulta fundamental ajustar y validar esta información a medida que se desarrolle la mina, y tener claro que el uso que se le puede dar a un modelo de estas características es sólo para análisis de tipo conceptual y global, teniendo que utilizar la información de mapeos de detalle para análisis de mayor precisión.

Figura 10. Vista isométrica de modelo 3D de fallas mayores de Mina San Vicente.



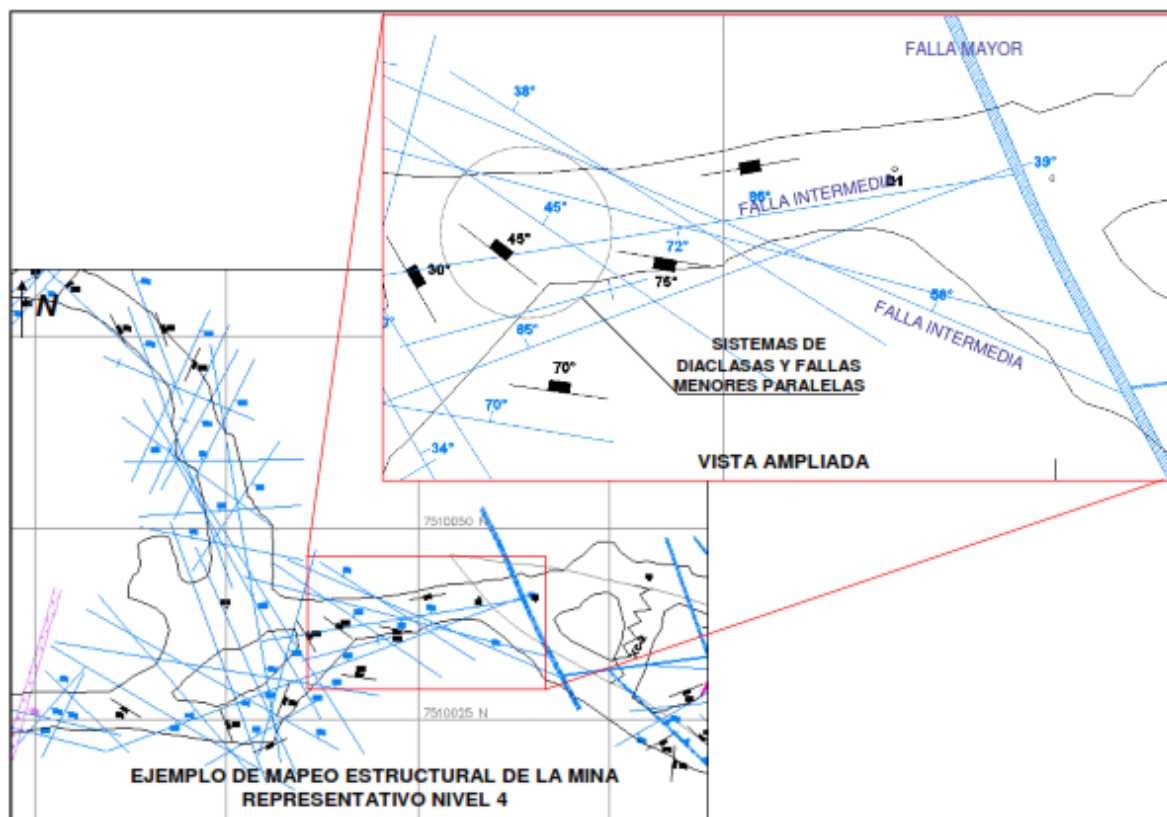
4.2.2. Fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas

Como se mencionó anteriormente, en la mina se identifican fallas intermedias (espesores entre 2 y 10 centímetros) y menores (espesores menores a 2 centímetros), las cuales se presentan con mayor persistencia (mayor cantidad) y menor continuidad. En general

presentan rellenos de óxidos de hierro. La Figura 10 muestra un mapeo estructural representativo de la mina donde se indican tipos de estructuras.

Dada la gran cantidad de estructuras de este tipo de estructuras, su tratamiento para análisis globales será de tipo estadístico, determinándose sistemas de fallas dominantes. Sin embargo, a nivel de rutina (escala de galería), estas estructuras combinadas entre sí, o con fallas mayores, generan bloques que pueden desprenderse, por lo que también deberán tener un tratamiento particular (seguimiento y análisis de cada una) sobre todo a nivel de rutina.

Figura 11. Mapeo estructural representativo de la mina, tomado de nivel 4.



Las familias de diaclasas reconocidas y mapeadas en la mina, se presentan con poca continuidad (cortos, menores a 3 metros) y con planos rugosos.

A partir de la información de mapeos estructurales, se generó una base de datos con todas las estructuras de la mina reconocidas hasta ahora (fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas). A partir de proyecciones estereográficas realizadas, se puede concluir que las orientaciones mostradas por fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas son equivalentes, y pertenecerían a un mismo evento geológico, por lo que en términos de definición de orientaciones dominantes serán tratadas como un grupo común. La Figura 11 muestra la proyección estereográfica de fallas intermedias, menores y diaclasas de la mina, a partir del cual se obtienen los sistemas dominantes listados en Tabla 2.

Figura 12. Estereonet mostrando sistemas de estructuras intermedias y menores dominantes.

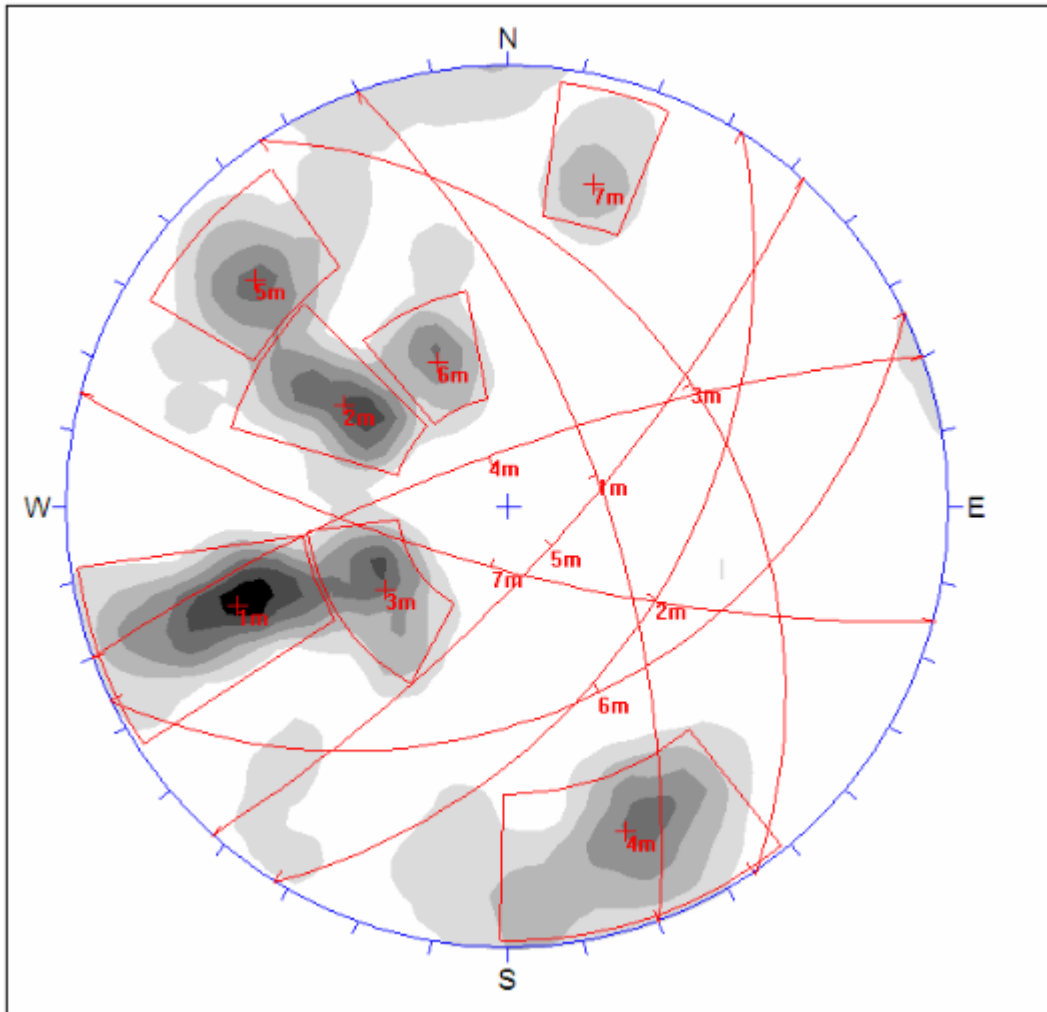


Tabla 2. Resumen sistema de fallas intermedias, menores y diaclasas dominantes

Mina San Vicente.

(ID)	RUMBO	MANTEO	CARACTERÍSTICAS
NOMBRE DE SISTEMA			

S1	N 10° - 30° W	50° - 80° E	Sistema de mayor persistencia en la mina
S2	N 15° - 45° E	25° - 65° SE	Sistema sub paralelo a falla mayor 614
S3	N 10° - 50° W	25° - 45° NE	Sistema que marca la estratificación
S4	N 65° E - EW	65° N - 90°	
S5	N 30° - 55° E	65° - 85° SE	Sistema sub paralelo a falla regional Camino
S6	N 50° - 70° E	25° - 50° SE	
S7	N 65° - 86° W	65° - 86° S	Si bien este sistema tiene pocos individuos, a priori se puede visualizar que es complejo en términos geotécnicos al combinarse con otros (ejemplo, pilar cortado cámara 1)

Como ha quedado plasmado, resulta fundamental la diferenciación estructural (fallas mayores, intermedias, menores y sistemas de diaclasas) durante el proceso de toma de datos, para así facilitar y realizar los análisis con la información apropiada en cada caso.

4.3. Calidad de macizo rocoso

Para estimar la calidad del macizo rocoso de la zona del proyecto, se realizaron por parte de EMT y de geología de Minera Antares mapeos para clasificar el macizo rocoso mediante la determinación del índice Rock Mass Rating (RMR) propuesto por Bieniawski (1989), el cual varía entre 0 y 100 (de muy mala calidad a muy buena calidad geotécnica) asignando puntajes a los siguientes parámetros:

- RQD (Rock Quality Designation). En este caso fue estimado en terreno a partir de medidas en galerías.
- UCS (Uniaxial Compressive Strength). Estimado a partir de golpes de martillo geológico según escala de durezas de Deere & Jennings & Robertson (1969).
- Espaciamiento de discontinuidades: Estimado a partir de mapeos de terreno.
- Condición de Discontinuidades: Estimación de condiciones de relleno, rugosidad, alteración y apertura de discontinuidades a partir de observaciones de terreno.
- Condición de agua: Incorporado en función de los antecedentes (condiciones secas)
- Ajuste por orientación de discontinuidades. Este ajuste, aplicado en función del efecto de la orientación de discontinuidades sobre infraestructuras particulares (túneles, taludes, fundaciones) que en este caso no fue considerado.

A partir de la información de celdas de mapeo de RMR realizadas en las labores de la mina, se puede concluir que el macizo rocoso en los actuales niveles en Mina San Vicente es de regular a buena calidad geotécnica, con valores de RMR para la roca de caja entre 60 y 65, y 55 a 60 para la zona mineralizada. En términos generales, se puede concluir que la roca se encuentra con moderado a bajo grado de fracturamiento, y RQD variables entre 50% - 75%. La estimación del parámetro UCS a partir de golpes de martillo geológico, se describe

como Dura a Muy Dura (R4 a R5 según escala de Deere y que equivaldría a valores entre 55 – 110 MPA y 110 a 220 MPa respectivamente).

Las estructuras menores se encuentran moderadamente espaciadas, con superficies en general rugosas, baja continuidad y rellenos despreciables. Las paredes de las estructuras en general presentan moderado a bajo grado de alteración. Las condiciones actuales de la mina indican que no hay presencia de agua, sin embargo, esta condición debe ser chequeada y considerada en profundidad, puesto que además de influir en forma negativa en la calidad del macizo rocoso, afecta la operación.

La condición general del macizo rocoso debe ser chequeada, validada y complementada con información de profundidad y a medida que se generen nuevos desarrollos. Esto es fundamental para validar los actuales modelos, parámetros de diseño y predecir el comportamiento geotécnico de la mina.

4.4. Propiedades de la roca intacta y condición de esfuerzos

Tratándose que Mina San Vicente es una faena relativamente nueva, no se dispone de antecedentes de medidas de propiedades de la roca intacta (como por ejemplo ensayos de resistencia a la compresión simple). Como se mencionó en capítulo anterior, este parámetro en particular fue estimado a partir de golpes de martillo geológico, sin embargo, sería de mucha utilidad que a futuro, cuando se inicien campañas de sondajes de diamantina, se separen muestras para testeado en laboratorio.

Para el análisis se consideró un campo de esfuerzos gravitacionales, con alturas de carga promedio entre 150 m y 200 m. Lo anterior implica un régimen de esfuerzos con magnitudes entre 4 y 6 MPa en sentido vertical. Los esfuerzos horizontales fueron estimados

considerando una razón $k = sH / s$ entre 1.5 y 2.2. Lo anterior implica esfuerzos horizontales entre 8.0 y 12.0 MPa. Se consideró una orientación del esfuerzo principal máximo en dirección NW.

4.5. Modelo geotécnico y mecanismos de inestabilidad

Como resumen de todos los antecedentes expuestos anteriormente, se plantea que las unidades geotécnicas en la mina, son tres:

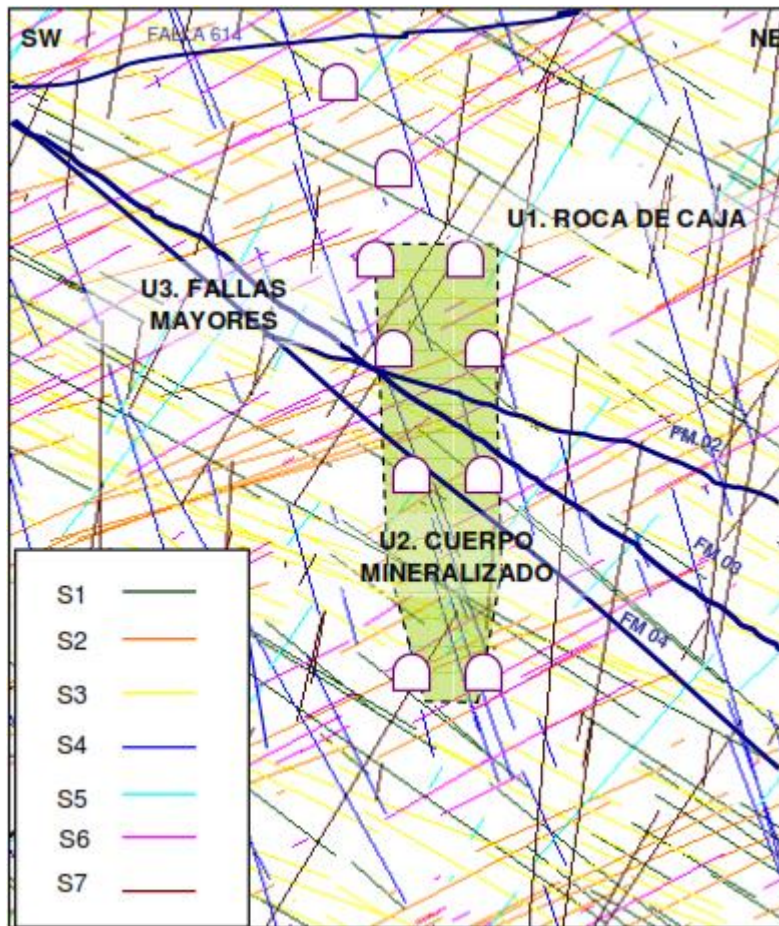
Unidad 1. Roca de caja, que reúne a las rocas andesíticas, tobas y areniscas, de buena calidad geotécnica

Unidad 2. Cuerpo mineralizado, regular a buena calidad geotécnica

Unidad 3. Zonas de fallas mayores o alta concentración de fallas, de regular a mala calidad geotécnica

La Figura 12 muestra un esquema representativo del modelo geotécnico propuesto para Mina Rulita.

Figura 13. Perfil esquemático mostrando modelo geotécnico de mina San Vicente.

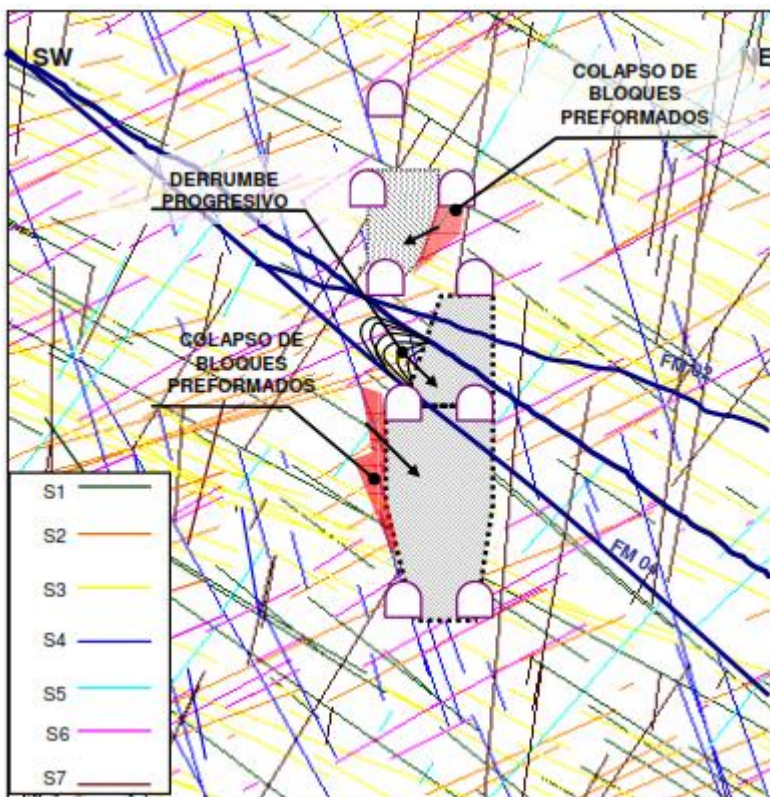


En función de lo anterior, los mecanismos de inestabilidad esperados para la mina son desprendimiento o deslizamiento de bloques preformados limitados por fallas y/o discontinuidades menores y derrumbe progresivo o caving en las zonas de alta concentración de fallas y mala calidad del macizo rocoso.

El desprendimiento o deslizamiento de bloques preformados limitados por fallas y/o discontinuidades menores estará determinado por la presencia de fallas intermedias, que en conjunto con sistemas de discontinuidades menores, definen bloques o cuñas sensibles a desprenderse cuando se les genera cara libre. Este potencial mecanismo puede incrementar la dilución, disminuir la calidad de la tronadura por presencia de grandes bloques

preformados y corte de tiros y comprometer accesos. En la etapa de ingeniería de detalle y control rutinario se deberán identificar estos potenciales comportamientos mediante una proyección estructural de la información obtenida con mapeos geológico-estructurales. El derrumbe progresivo o caving consiste en el desprendimiento progresivo de material rocoso (unravelling). Dada la geometría tabular de los cuerpos, el potencial desprendimiento se presentaría principalmente de las cajas o paredes de los caserones. Para minimizar la probabilidad de activación de este mecanismo, las dimensiones de los caserones no deben sobrepasar el Radio Hidráulico Máximo Admisible. La Figura 13 muestra en forma esquemática los potenciales mecanismos de inestabilidad esperados.

Figura 14. Perfil esquemático mostrando potenciales mecanismos de inestabilidad esperados.



Capítulo V

Análisis de Resultados

4.1. Análisis minero-geotécnico

4.1.1. Dimensionamiento de unidades de explotación

Como base para el dimensionamiento de unidades de explotación o cámaras se consideraron los siguientes aspectos:

- Configuración de accesos determina una explotación descendente
- La explotación no considera el ingreso de personal o equipos a los caserones.
- Mínima dilución del mineral a extraer.
- Dimensiones que permitan flexibilidad operacional

Dada la geometría de los cuerpos a explotar y el tipo de mecanismos de inestabilidad identificados, se consideraron como herramientas empíricas de análisis, la aplicación del método gráfico de estabilidad de Mathews para el análisis de paredes del caserón, y Laubscher para el dimensionamiento de techos del caserón.

4.1.2. Análisis de estabilidad y dimensionamiento de cámaras (Método de Mathews)

Una técnica ampliamente usada en el proceso de diseño de caserones o cámaras para definir las dimensiones de unidades de explotación en cuerpos tabulares, es el Método Gráfico de Estabilidad introducido por Mathews (1980) y más tarde modificado por Potvin

(1989). La versión más reciente del método, actualizado por C. Mawdesley y R. Trueman (2000), está basada en el análisis de más de 400 casos históricos recopilados de minas subterráneas Canadienses y Australianas, y permite estimar la probabilidad de falla para un determinado diseño de caserón (ver Figura 14). El método consiste en la determinación del “stability number (N)”, el cual se obtiene de la ecuación:

$$N = Q' \times A \times B \times C$$

Donde:

Q': Rock Tunnelling Quality Index de Barton (1974) – es decir Q, con SRF=1

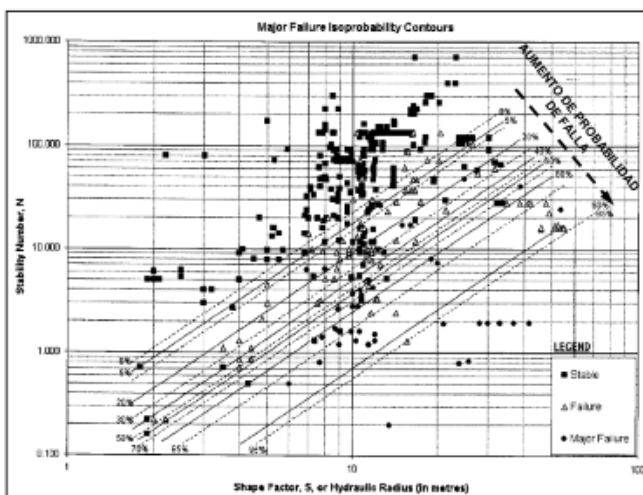
A: Factor de condición de esfuerzos

B: Factor de orientación de estructuras

C: Factor de componente gravitacional

El parámetro N representa la calidad de macizo y condición geotécnica del área a explotar. Una vez calculado, se ingresa a la gráfica de Mathews (Figura 14) y se evalúa la condición de estabilidad para un determinado valor de radio hidráulico (Área/Perímetro) de la pared colgante, pared yacente o techo de un caserón.

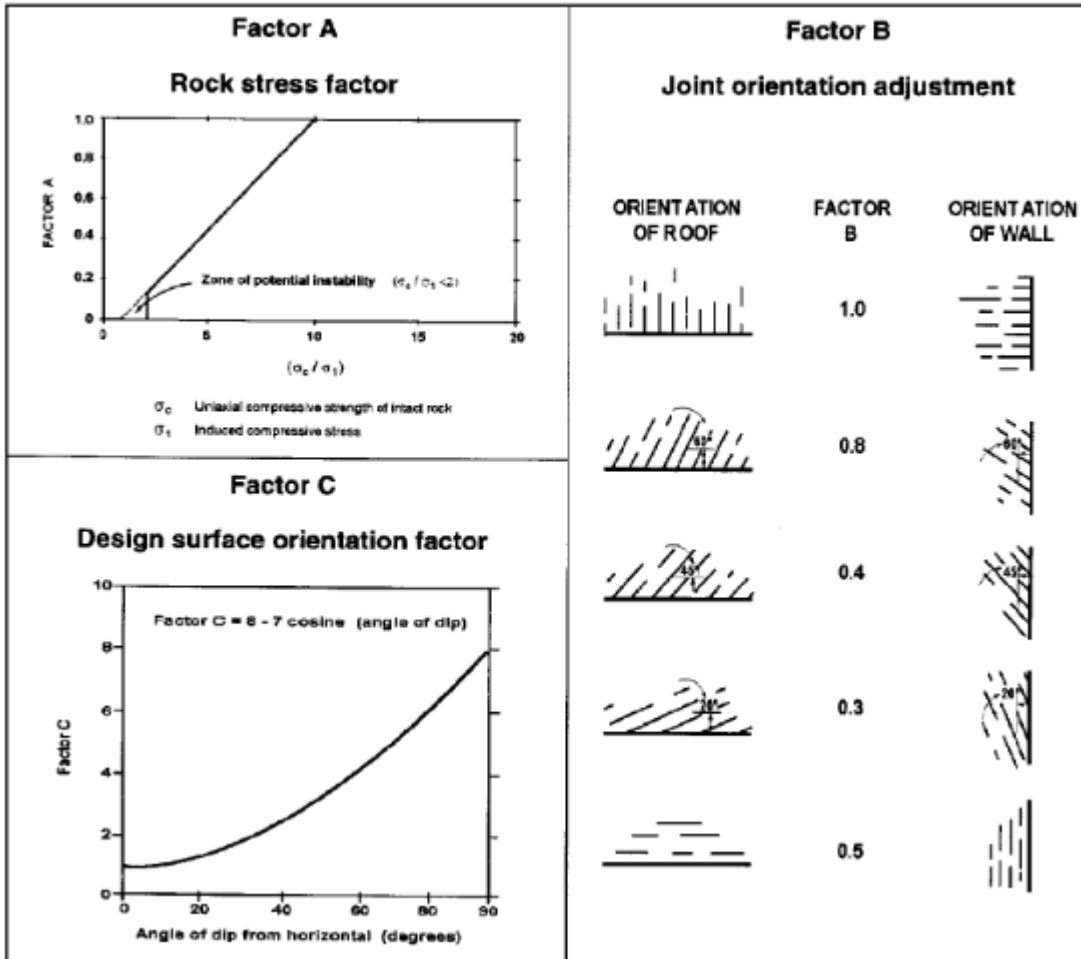
Figura 15. Gráfico del Método de estabilidad de Mathews.



Para la aplicación del método al proyecto, la estimación del parámetro Q' (Q con SRF igual a 1) se basó en las propiedades del macizo rocoso obtenidas de la información geotécnica existente, obteniendo mediante técnicas empíricas que relacionan valores de Q de Barton a partir de los valores de RMR, y validados con estimaciones realizadas en terreno de Q .

La estimación de los factores de ajuste A , B y C se realizó en base a la experiencia de EMT de acuerdo a las gráficas de la Figura 15 y considerando una condición de esfuerzos gravitacionales. Dado que el modelo geotécnico indica que las paredes y techos de los caserones corresponderán principalmente a rocas volcánicas y zona de veta respectivamente, se consideraron las propiedades de estas unidades geotécnicas para la estimación del parámetro N .

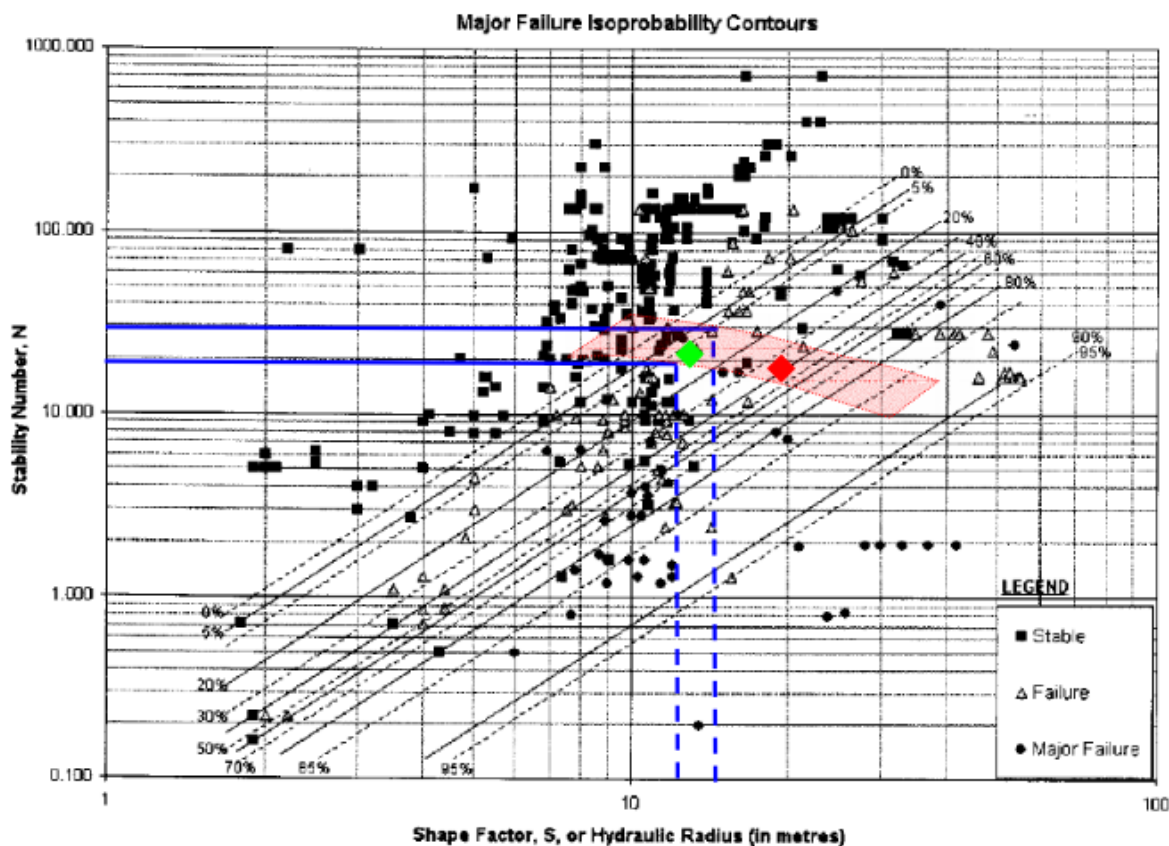
Figura 16. Factores de ajuste Método de Mathews.



La Figura 16 presenta los resultados de la aplicación de la metodología de Mathews, donde muestra que las dimensiones máximas de las paredes de los caserones deben definir RadiosHidráulicos menores a 12.0 m.

- Para un RH menor a 12.0 m, las dimensiones de paredes debe ser menores a 40 m de alto por 60 m de largo.
- Dado que las dimensiones del cuerpo son mayores a las máximas dimensiones estables, se requerirá mantener pilares entre unidades de explotación.

Figura 17. Gráfica de estabilidad de Mathew.



4.1.3. Análisis de estabilidad y dimensionamiento de cámaras (Método de Laubscher)

El método gráfico de estabilidad de Laubscher, relaciona la calidad del macizo expresada a través del parámetro MRMR (Mining Rock Mass Rating) y el radio hidráulico (RH) de una excavación. El parámetro MRMR se obtiene ajustando el parámetro RMR según las condiciones de esfuerzo, calidad de tronadura y orientación de discontinuidades presentes en el sector. Para el caso del sector en estudio, se calculó el parámetro MRMR para el techo de las cámaras, asumiendo ambos tipos de roca (volcánicos y zona de veta).

La estimación del parámetro MRMR consideró los siguientes ajustes:

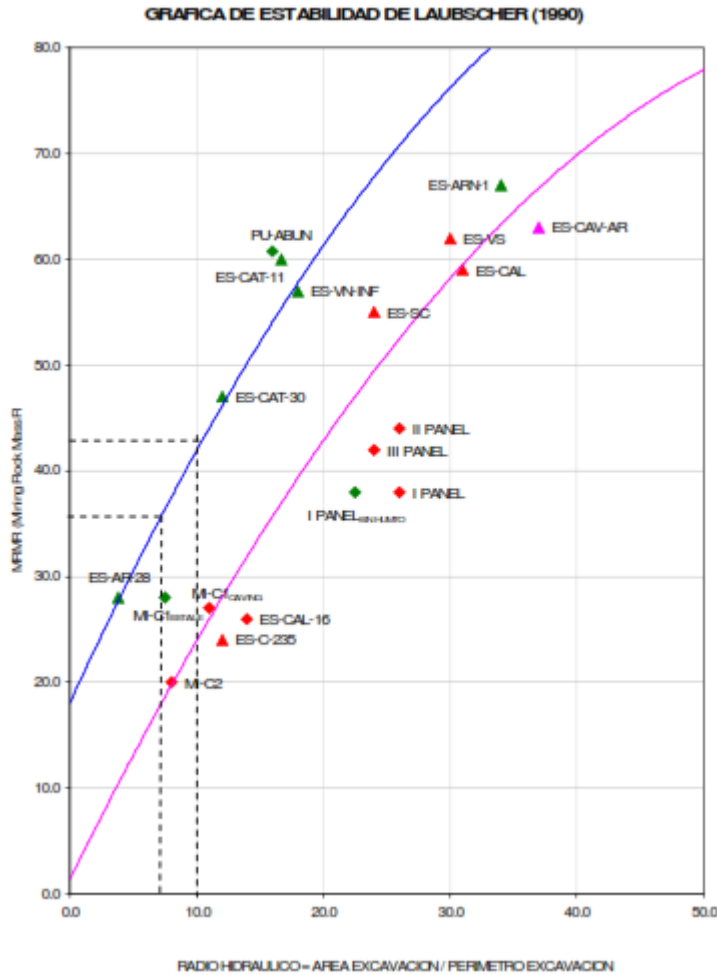
- Ajuste por condición de esfuerzos: se consideró un factor de 1, dado que existen esfuerzos horizontales que aportan a la estabilidad
- Ajuste por tronadura: asumiendo una calidad buena de la tronadura se consideró un valor de 0.94
- Ajuste por orientación de estructuras: dado que las estructuras presentes formarían bloques o cuñas de potencial “caída libre” al techo – condición desfavorable – se consideró un valor de 0.70.

Para el análisis de estabilidad, se consideró un valor de RMR representativo para ambos sectores entre 50 y 60, obteniéndose valores de MRMR entre 36 y 42.

Para la evaluación de la sensibilidad al caving, se consideraron techos en la zona estable, con radios hidráulicos (RH) menores a 10. Fijando el ancho de la excavación entre 20 y 30 metros (ancho máximo de veta), se tendrían largos máximos de explotación de 50 metros.

En la Figura 17 muestra los resultados obtenidos:

Figura 18. Representación de resultados obtenidos en la gráfica de Laubscher.



4.1.4. Dimensionamiento de pilares

Como herramienta para el análisis se utilizó la gráfica de estabilidad de pilares de Lunder and Pakalnis (1997). Esta gráfica (ver Figura 5.5) está construida por extensas bases de datos de pilares en “hard rock” (178 casos). La gráfica considera como con datos de entrada los siguientes parámetros:

- Relación ancho (W) / alto (H) del pilar a evaluar. En donde la altura del pilar queda determinada en el eje del sentido del máximo esfuerzo de sollicitación del pilar.
- Carga en el pilar (Pillar Stress)

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta representativa del pilar.

Lunder y Pakalnis proponen que la resistencia del pilar puede ser expresada adecuadamente por dos líneas de Factores de Seguridad (Factor of Safety, líneas FOS destacadas en gráfica). Pilares con $FOS < 1$ presentan un fallamiento mayor (colapso), mientras que pilares con $FOS > 1.4$ no presentan daño. La región con $1 < FOS < 1.4$, corresponde a pilares que presentan condiciones de inestabilidad local, con activación de fenómenos de *spalling* y *slabbing* (lajamientos) sin presentar un fallamiento mayor.

El dimensionamiento de pilares para el estudio, se basó en mantener paredes estables (áreas abiertas de paredes menores al RH admisible). En principio se consideran pilares no recuperables, es decir, las dimensiones deben ser las mínimas estables y el diseño no considera infraestructura (labores) para recuperación de pilares.

Como criterios de aceptabilidad para el diseño de pilares se consideró un Factor de Seguridad mayor a 1.4 de acuerdo al método de Lunder & Pakalnis (1997)

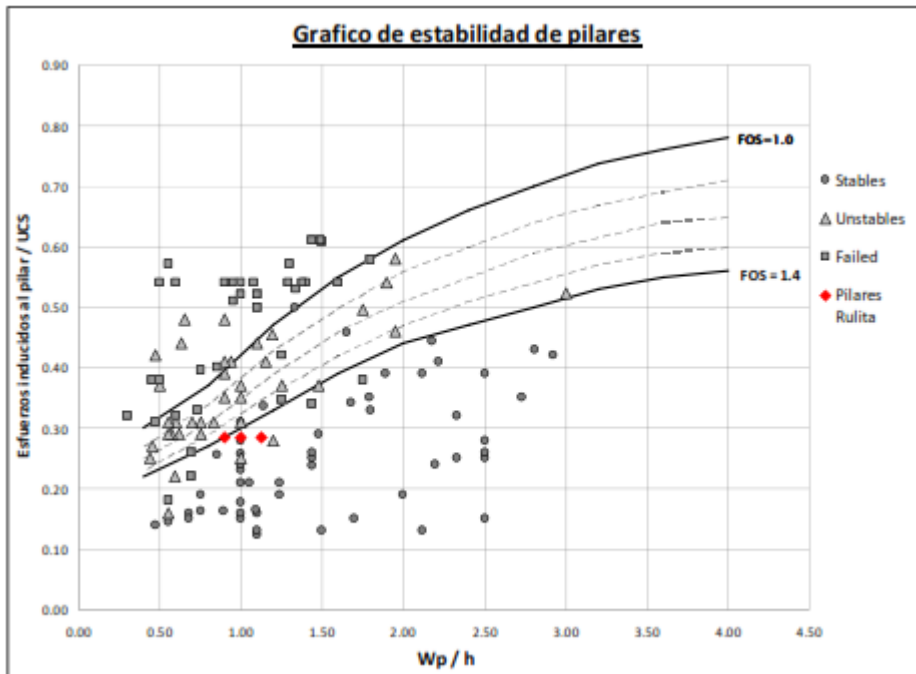
Considerando la potencia del cuerpo mineralizado como dimensión fija para los pilares (esta dimensión en términos geotécnicos corresponde a la “altura” de pilares dado que la carga o esfuerzo solicitante será horizontal), se determinaron los anchos mínimos para mantener una geometría estable de pilares. En otra palabras se determinó la relación W/H necesaria para la estabilidad, donde W es el ancho del pilar, y H es la altura de pilar (en el caso de estudio corresponde la dimensión horizontales el sentido de la potencia del cuerpo mineralizado). La dimensión W debe ser mantenida tanto en dirección longitudinal del cuerpo, como en sentido vertical.

La Figura 18 muestra la relación W/H para las condiciones de proyecto San Vicente debe ser mayor a 0.9. Lo anterior implica que para una potencia o abertura de caserón de 20 m, se requiere un pilar ancho mínimo de 18 m.

Para asegura el ancho mínimo en sentido longitudinal, y considerando los patrones estructurales, se recomienda mantener una razón W/H mayor a 1.1, esto es, para un ancho de explotación de 20 m, mantener un pilar de 22.0 m.

Se destaca que las dimensiones de pilares obtenidas mediante técnicas empíricas, solamente consideran la calidad del macizo rocoso. En forma paralela se analizó la condición geométrica – estructural dada por fallas mayores que puedan variar por lado la ubicación y por otro lado las dimensiones de pilares.

Figura 19. Gráfico de estabilidad de pilares de Lunder y Pakalnis (1997).



5.2.Alertas geotécnicas

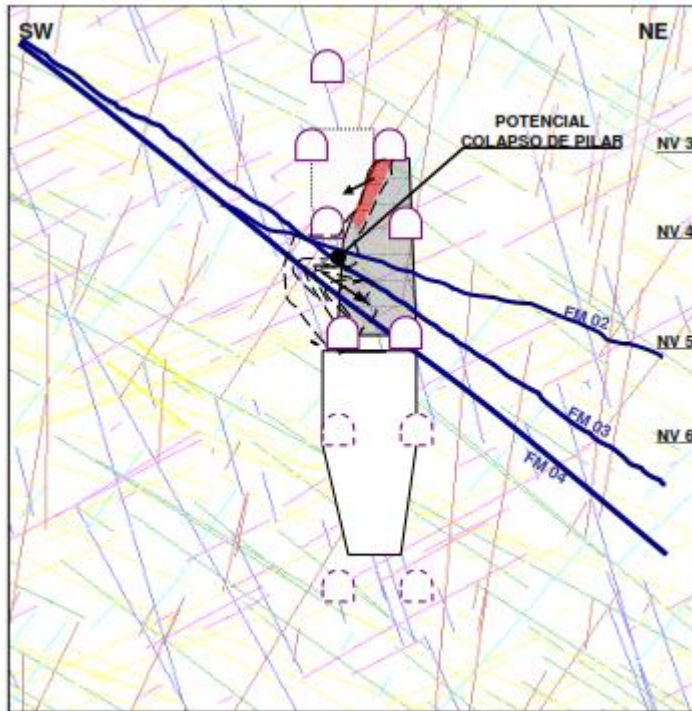
5.2.1. Análisis geométrico – estructural de fallas mayores

A partir del modelamiento conceptual 3D de las ocho fallas mayores actualmente identificadas, se visualizaron los potenciales bloques mayores y/o cuñas que pudieran afectar la explotación del proyecto. Las ventajas del manejo 3D de estas geometrías, es la fácil visualización en forma rápida de plantas y perfiles en cualquier dirección.

Las alertas identificadas se resumen como sigue:

- Potencial corte de Pilar central entre niveles 4 y 5 por falla mayor FM04 (ver Figura 19 donde se muestra esquemáticamente mecanismo). Para evitar el deterioro y colapso del pilar, se requiere aumentar su dimensión vertical de manera que la base del pilar no esté sensible a desprendimientos. En este caso, se recomienda prolongar el pilar entre niveles 3 y 5. Lo anterior implica mantener un pilar de 18 metros en sentido longitudinal y 40 metros en sentido vertical. Dadas las nuevas dimensiones, se deberá evaluar la recuperación de este pilar en una etapa final de explotación, para lo cual se requerirá una infraestructura acorde para la tronadura masiva del pilar central.

Figura 20. Vista esquemática de potencial colapso de pilar niveles 4 y 5 por falla FM04.



- Potencial corte de pilar inferior NW de Etapa 2, por falla mayor FM05. Esta condición también deberá ser atendida con diseño, una vez que se tengan mayores antecedentes de la continuidad de falla FM05 en profundidad.
- Potencial bloque mayor en pared SW de cuerpo, limitado por fallas mayores FM01, FM04 y alguna falla intermedia o menor paralela a falla Camino. Esta condición es sólo una alerta, que deberá ser considerada y revisada una vez que se tenga el diseño definitivo de los cuerpos a explotar, e información de mapeo de nivel 5 e inferiores.

Estas potenciales condiciones identificadas - y futuras que puedan aparecer a medida que la información estructural y geotécnica se robustezca - deberán ser analizadas en detalle y hacerles seguimiento durante el desarrollo del proyecto. Las formas de minimizar el impacto de este tipo de mecanismos, es mediante la generación y uso de una correcta secuencia de tronadura que considere estas alertas, ubicación de pilares mediante diseños

mineros – geotécnicos. Otra forma de minimizar el impacto de este tipo de mecanismos, es definiendo un sistema de soporte robusto (en aquellas condiciones donde técnicamente sea factible). Para anticiparse a estos mecanismos o eventos, es recomendable evaluar la instalación de sistemas de monitoreo geomecánico que permitan predecir posibles desplazamientos de bloques y/o movimiento de fallas.

5.2.2. *Análisis de fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas*

Como se mencionó en capítulos anteriores, el tratamiento a nivel de análisis global de las estructuras intermedias y menores, fue de tipo estadístico. De esta forma, en esta etapa del estudio se definen sectores sensibles a la formación de potenciales bloques o cuñas sensibles a partir de los sistemas dominantes (ver Figura 20). Para las paredes de los caserones teóricos (NE y SW) en sentido longitudinal, se tendrán sistemas que formen cuñas, especialmente en pared NE, situación que ya fue evidenciada en el avance actual de la explotación por la presencia del sistema S7. De la misma forma, para las paredes transversales de caserones (NW y SE), que, si bien son de menor dimensión por el ancho del cuerpo, también se espera la formación de bloques y cuñas sensibles a deslizar, especialmente en las paredes tipo NW. El resumen de los sistemas que presentan alertas por pared se presentan en Tabla 3.

Tabla 3. Potenciales alertas definidas por fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas.

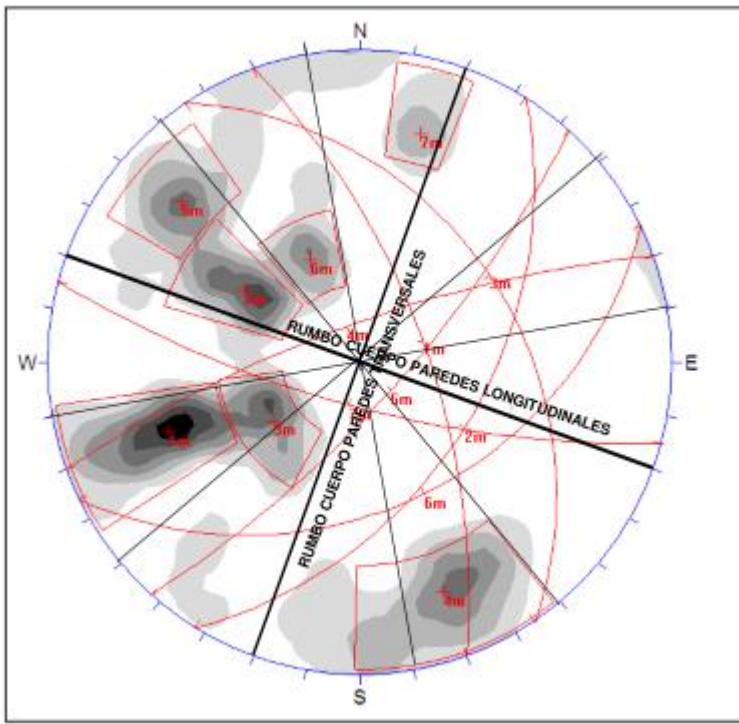
Pared	Sistemas involucrados
NE (Sentido longitudinal del cuerpo)	S2 – S5 – S7

	<p>S6 – S5 – S7</p> <p>S1 – S6 – S7</p> <p>S5 - S3 - S7</p> <p>S2 – S5 – S4</p> <p>S6 – S5 – S4</p> <p>S1 - S6 – S4</p> <p>S5 – S3 – S4</p>
SW (Sentido longitudinal del cuerpo)	<p>S2 – S3 – S4</p> <p>S1 – S6 – S4</p> <p>S1 – S2 – S4</p> <p>S2 – S3 – S7</p> <p>S1 – S6 – S7</p> <p>S1 – S2 – S7</p>
SE (Sentido transversal del cuerpo)	<p>S2 – S7 – S6</p> <p>S2 – S4 – S6</p>
NW (Sentido transversal del cuerpo)	<p>S1 – S2 – S6</p> <p>S3 - S2 – S6</p> <p>S2 – S3 – S6</p>

	S3 – S6 – S5
	S1 – S2 – S5
	S3 – S2 – S5
	S6 – S1 – S5

El análisis estructural detallado de las geometrías esperadas, el porcentaje de dilución y el impacto en la estabilidad local o de accesos en función de las geometrías sensibles, debe ser analizado y manejado con las secuencias de tronadura de detalle de cada caserón. Estos mecanismos son en su mayoría identificables en forma anticipada si se trabaja con bases de datos robustas (mapeos), correctas proyecciones estructurales y análisis de información.

Figura 21. Proyección estereográfica de sistemas dominantes y paredes de potenciales caserones.



Dada la sensibilidad detectada de las paredes NW, se recomienda mantener un estricto control estructural y evaluación de los potenciales bloques o cuñas en estas paredes, para evitar problemas de inestabilidad en los bordes de caserones en explotación. Además, se deben realizar secuencias de tronadura de detalle, con información estructural robusta que permita minimizar el impacto en la explotación.

5.3. Secuencia global de explotación

En base al análisis minero - geotécnico se definió una estrategia de explotación que considera lo siguiente:

- Radios hidráulicos para paredes menores a 12 m (60 m de alto por 40 m de largo)

- Se consideró una primera etapa de explotación sobre nivel 5, y una segunda etapa bajo nivel 5.
- Para la primera etapa se debe considerar pilar central entre los niveles 4 y 5, mostrado en Figura 21. Este pilar fue definido en función de los resultados de técnicas empíricas y de acuerdo a los resultados del análisis geométrico estructural. Si bien, para una explotación de caserones de 20 m de ancho, se debe considerar en el diseño un pilar de 22 m de largo (sentido longitudinal) y de 16 a 18 m en sentido vertical (distancia entre niveles), esta condición fue modificada por la presencia de la falla FM04, la cual corta el pilar y podría generar colapso (mostrado en Figura 22).
- Esta condición mantiene el nivel 6 a una distancia de 20 metros (referenciales) por debajo del nivel 5, y a partir del nivel 7 se sugiere aumentar la distancia entre los niveles de explotación.
- Para una segunda etapa, bajo el nivel 6, se debe considerar una estrategia que mantenga una placa-puente, o una estrategia de explotación con pilares transversales alternados que mantengan paredes con RH menores a 12 m. La Figura 23 muestra esquemáticamente la estrategia con pilares alternados. La ubicación de pilares bajo el nivel 5, dependerá de una revisión detallada de las condiciones estructurales, basada en la información de mapeos que se recoja del avance de labores de los niveles inferiores.
- Para minimizar potenciales geometrías desfavorables o sensibles a deslizar, y poner en riesgos accesos, la recomendación es explotar las cámaras a sección completa, es decir, desarrollar tronaduras de producción desde ambas galerías y evitar el avance de la explotación por una sola galería.

- Dada la configuración de galerías y el método de explotación elegido, la secuencia de explotación global recomendada es en retroceso de SE a NW, y así evitar riesgos de pérdida de accesos

Figura 22. Vista en planta nivel 5. Ubicación pilar central entre niveles 4 y 5.

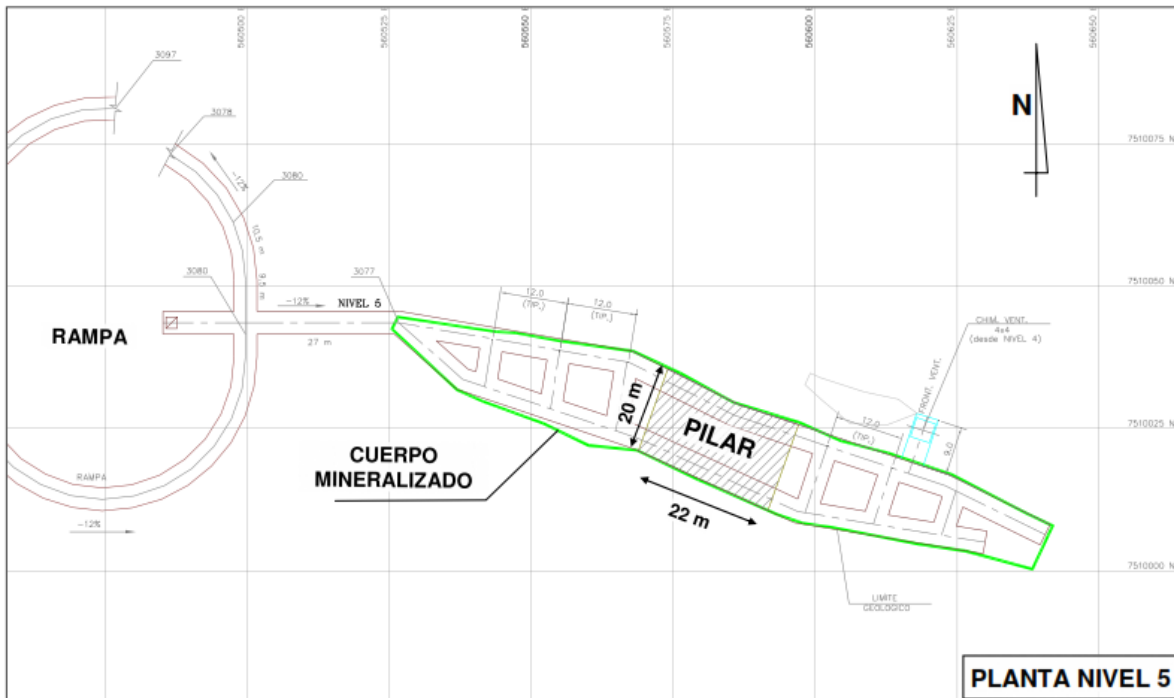


Figura 23. Aumento de pilar niveles 4 y 5 por condición estructural.

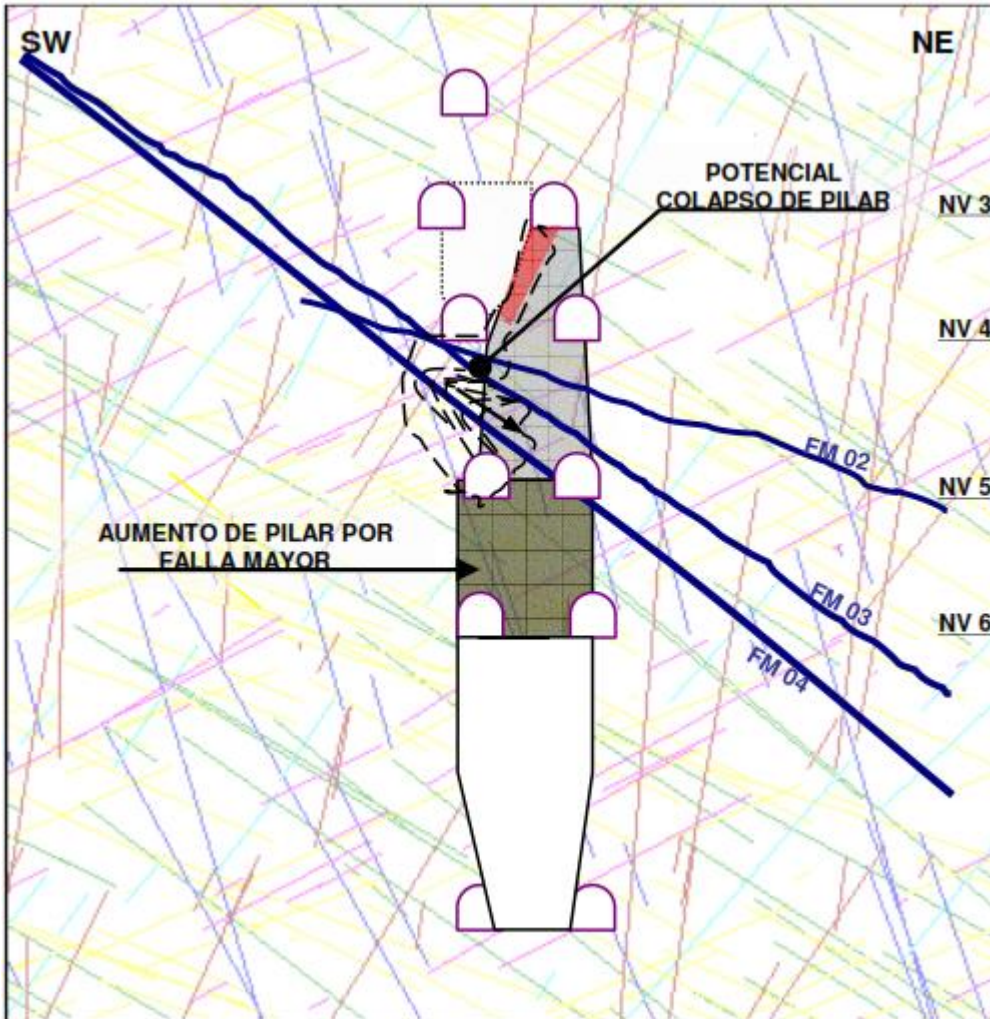
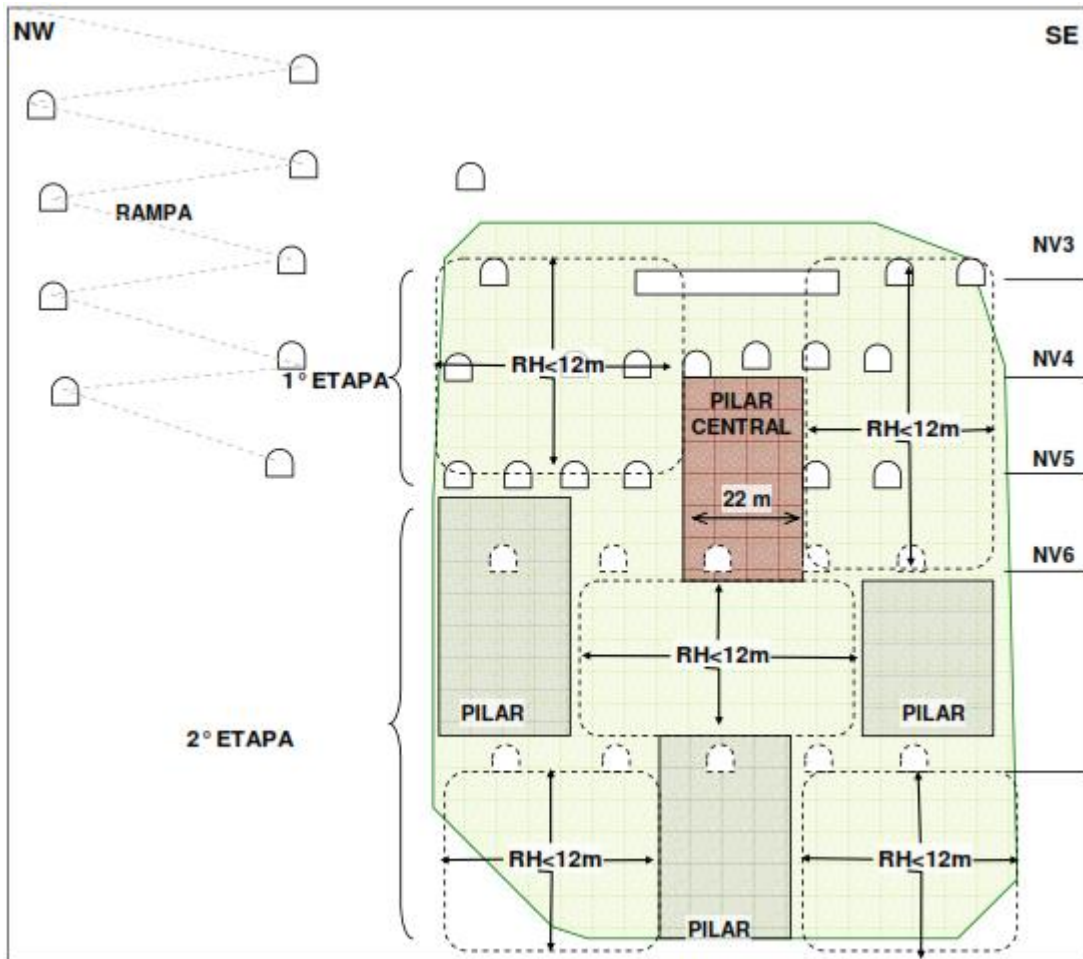


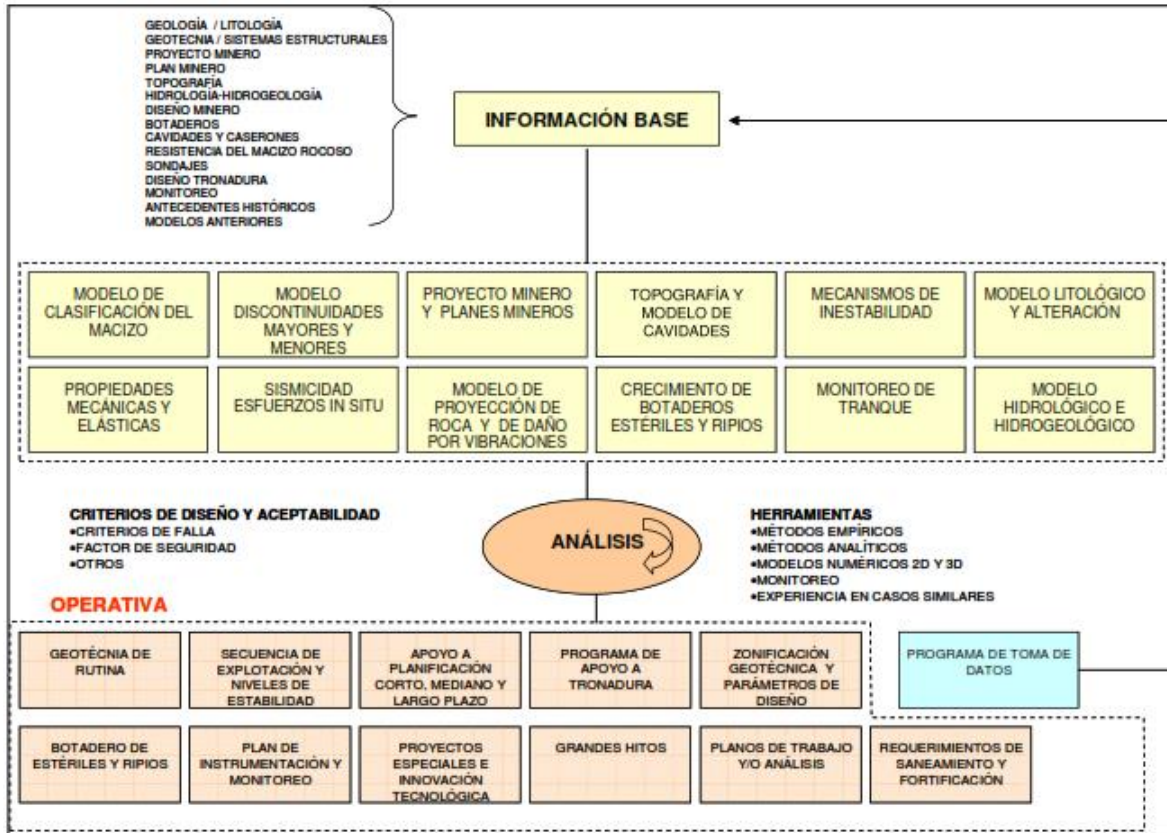
Figura 24. Perfil longitudinal esquemático mostrando radios hidráulicos máximos y distribución de pilares.



5.4. Proceso geotécnico y geotécnia de rutina

Como se ha mencionado en informes anteriores emitidos por la empresa asesora en el contexto del proyecto, es importante llevar la geotecnia de la mina mediante el Proceso Geotécnico, entendiéndolo como la sucesión de tareas a ser desarrolladas para el óptimo cumplimiento de los estándares geotécnicos de la mina (esquemático en Figura 24) apuntando siempre a mantener la continuidad operacional de la mina y evitar eventos inesperados.

Figura 25. Diagrama proceso geotécnico.



Dentro de este contexto, la Geotecnia de rutina resulta de suma importancia para materializar el proyecto de explotación con mínimas desviaciones y bajo condiciones operacionales seguras. El o los encargados de esta área deberán mantener un seguimiento sistemático que considere los siguientes aspectos:

- Cumplimiento de parámetros de diseño.
- Registro de comportamiento de macizo rocoso (eventos geotécnicos a escala local, sobre excavaciones, daño en pilares etc.)
- Revisión y evaluación de condiciones locales en frentes de avance.
- Toma de datos geotécnicos de rutina y seguimiento a Modelo Geotécnico, con especial énfasis en el mapeo geotécnico estructural.

- Generación de recomendaciones de apoyo a la operación (recomendaciones de fortificación, secuencias de avance, etc.)

Conclusiones

- La actual información geológica y estructural de Mina San Vicente, con la cual se desarrolló el proyecto, es de buena calidad y confiabilidad. A partir de esta información, se concluyó en Mina San Vicente existen reconocidas ocho fallas mayores, además de fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas.
- Las fallas mayores deben ser tratadas en forma particular. Para el estudio, se generaron superficies 3D teóricas a partir de los pocos antecedentes disponibles de cada una. Este modelo debe ser actualizado, validado y robustecido a medida que la mina abra nuevos desarrollos o se tenga nueva información.
- Las fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas, dado su gran número de individuos, deben ser tratadas en forma estadística a nivel de análisis globales. Sin embargo, para análisis locales y de rutina, deben ser consideradas como entes individuales.
- El macizo rocoso de Mina San Vicente es de buena a regular calidad geotécnica. Los mecanismos de inestabilidad esperados para el proyecto son de dos tipos: Colapso o deslizamiento de bloques preformados limitados por estructuras y Derrumbe progresivo a caving asociado a zonas de menor calidad de macizo y zonas de fallas mayores.
- Los modelos conceptuales, tanto de estructuras, calidad del macizo y mecanismos de inestabilidad esperados, deberán ser actualizados y robustecidos a medida que se desarrolle la mina. Esto es fundamental para llevar un correcto control geotécnico de los diseños, prevenir eventos y validar diseños.

- El dimensionamiento de unidades de explotación estables se realizó mediante la aplicación de técnicas empíricas ampliamente utilizadas en la industria minera, como lo es el Método Gráfico de Estabilidad introducido por Mathews (1980) y Gráfica de Laubscher (1990) para dimensionar unidades de explotación estables, y método de Lunder y Pakalnis (1997) para dimensionamiento de pilares.

- Los resultados obtenidos, indican que el diseño de cámaras es estable bajo las siguientes dimensiones:
 - Radios Hidráulicos de paredes menores a 12 ($RH < 12$), lo que implica paredes con dimensiones máximas de 40 metros de alto por 60 metros de largo.
 - Radios Hidráulicos de techos menores a 10 ($RH < 10$), lo que implica que para caserones de 20 a 30 metros de ancho, se puede abrir hasta 50 metros en la longitudinal.
 - La explotación requiere de pilares intermedios entre cámaras. De acuerdo a la condición de macizo rocoso, los pilares debieran tener anchos de 20 metros (ancho cuerpo), 22 metros de altura y 18 metros en sentido longitudinal. Sin embargo, el análisis geométrico – estructural realizado, detectó potenciales cortes en pilar entre niveles 4 y 5, lo que implica modificaciones en sus dimensiones para así obtener geometrías estables (altura 40 metros).

- Para otros sectores de la mina o niveles más profundos, estos parámetros de diseño podrían ser usados a nivel conceptual, sin embargo, deberán ser validados con estudios de detalle y con nueva información a medida que se generen nuevos desarrollos de la mina.
- Las alertas geomecánicas identificadas a escala mayor, corresponden a potenciales bloques o cortes de pilar generadas por presencia o combinación de fallas mayores. Estas alertas deben ser manejadas con modificaciones a los diseños una vez que las bases de datos estructurales y geotécnicos sean más robustas y se confirme la continuidad y disposición de las fallas mayores.
- A escala intermedia y menor, la combinación de fallas intermedias, menores y sistemas de diaclasas, también generan potenciales bloques sensibles a deslizar en las paredes del caserón y a escala de labores. El análisis y tratamiento de estos casos debe ser llevado por la geomecánica de rutina y secuencias de tronadura de detalle de cada caserón.
- En base a lo anterior, es necesario establecer rutinas de mapeo geotécnico sistemático que permitan elaborar un modelo geotécnico con información robusta y que integre las condiciones de calidad de macizo rocoso, patrones estructurales, cambios litológicos, información de sondajes, presencia de agua, etc. Lo anterior permitirá mejorar la capacidad predictiva del comportamiento del macizo rocoso y validar los diseños a medida que se desarrollen las nuevas cámaras.

Recomendaciones

- Dada la configuración de galerías y el método de explotación elegido, la secuencia de explotación global recomendada es en retroceso de SE a NW, y así evitar riesgos de pérdida de accesos.
- La ubicación de pilares debe ser evaluada con un análisis geométrico – estructural para cada caso.
- La tronadura debe ser realizada de manera de minimizar daño en paredes y pilares. Durante la explotación, se deberá evitar la generación de geometrías irregulares, dado que aumentan la generación de potenciales mecanismos
- Para minimizar potenciales geometrías desfavorables o sensibles a deslizar, y poner en riesgos accesos, la recomendación es explotar las cámaras a sección completa, es decir, desarrollar tronaduras de producción desde ambas galerías y evitar el avance de la explotación por una sola galería
- Para un óptimo manejo de identificación, análisis y recomendaciones ante potenciales mecanismos de inestabilidad en desarrollos y accesos, se recomienda que la mina cuente con un geomecánico de rutina capacitado en técnicas de identificación y análisis de mecanismos de inestabilidad y conocimientos básicos de operaciones mineras.
- Para definir sistemas soporte o fortificación de galerías o sectores particulares en función de las condiciones geotécnicas con exactitud, se reafirma la importancia de contar con un geomecánico de rutina que realice las labores de definir sistemas de soporte y control de las prácticas de implementación de fortificación. Es importante respaldar esta información mediante estándares de fortificación, los cuales permitan

estandarizar criterios y a la vez responder ante situaciones o potenciales eventos que incluso pueden tener efectos legales.

- En el mediano plazo, se sugiere diseñar e implementar un sistema de monitoreo geomecánico que permita anticipar la dilución. mejorar la capacidad predictiva en el comportamiento del macizo rocoso, mantener un seguimiento sistemático y generar una base de datos con información valiosa tanto para el desarrollo de análisis retrospectivos orientados a optimizar el dimensionamiento de unidades de explotación, como para una alerta temprana de potenciales eventos geomecánicos.

Referencia bibliográfica

- Abreu, J. (2012). Hipótesis, Método & Diseño de Investigación. *International Journal of Good Conscience*, 7 (20), 187-197. <http://www.spentamexico.org/v7-n2/7%282%29187-197.pdf>
- Arias, J., Villasís, M. y Miranda, M. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63 (2), 201-206. <https://www.redalyc.org/pdf/4867/486755023011.pdf>
- Campos, E. (2019). *Performance del método de explotación por cámaras y pilares en unidades mineras del Perú – 2018* [Proyecto de investigación, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio institucional. https://www.unsch.edu.pe/oficinas/vri/wp-content/uploads/2020/10/31Proyecto-2019_Campos-Edmundo.pdf
- Cañas, M. (2018). *Caracterización geológica y geomecánica de la mina San Joaquín, para el diseño de explotación por el método de cámaras y pilares* [Tesis de pregrado, Universidad Eafit]. Repositorio institucional. https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/13369/MariaCamila_Ca%c3%blasGaviria_2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Castro, A., Alejano, L., Monsalve, J. y Bernal, A. (2019). Diseño geotécnico de pilares en minas subterráneas de vetas auríferas en casos de Colombia. *Revista DYNA*, 86 (209), 337-346. <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.74041>
- Fernández, P., Vallejo, G., Livacic, P. y Tuero, E. (2014). Validez Estructurada para una investigación cuasi-experimental de calidad. Se cumplen 50 años de la presentación

- en sociedad de los diseños cuasi-experimentales. *Anales de psicología*, 30 (2), 756-771. <https://www.redalyc.org/pdf/167/16731188039.pdf>
- López, P. (2004). Población, muestra y muestreo. *Punto Cero*, 9 (8), 69-74. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012#:~:text=Es%20un%20subconjunto%20o%20parte,parte%20representativa%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.
- Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, Propiedad intelectual e industria. *CienciAmérica*, 3(1), 34-39. <http://cienciamerica.uti.edu.ec/openjournal/index.php/uti/article/view/30>
- Medina, V. (2017). *Diseño de cámaras y pilares basado en las características geomecánicas del macizo rocoso en la Corporación Minera Ananea S.A. – 2016* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional. http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6510/Medina_Aguilar_Victor_HugoI.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Osinergmin.
- Paye, H. (2018). *Influencia de los modelos geológico y geotécnico en el diseño de labores de desarrollo y preparación de la mina española Caraveli – Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Altiplano]. Repositorio institucional. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/9212/Paye_Carpio_Hembler_h.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valentín, Y. (2019). *Diseño geomecánico en el tajeo por subniveles con pilares corridos - mina Marcapunta Norte – Colquijirca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio institucional.
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1519/1/T026_71716136_T.pdf

Velazco, H. (2021). *Caracterización geo mecánica de las cámaras y pilares en la explotación del depósito de Au tipo manto para medir el dimensionamiento de sus labores en una mina artesanal del sector de Ananea Puno. Caso de estudio* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio institucional.
https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/4950/H.Velazco_Tesis_Titulo_Profesional_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y