

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Evaluación geomecánica para determinar el método de minado de la Mina**

**Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero de Minas**

**Autor:**

**Bach. Georje James ASTO QUISPE**

**Asesor:**

**Ing. Julio Cesar SANTIAGO RIVERA**

**Cerro de Pasco – Perú – 2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Evaluación geomecánica para determinar el método de minado de la Mina  
Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Ing. Toribio GARCIA CONTRERAS**

**PRESIDENTE**

---

**Mg. Silvestre Fabián BENAVIDES CHAGUA**

**MIEMBRO**

---

**Mg. Raúl FERNANDEZ MALLQUI**

**MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**  
**Facultad de Ingeniería de Minas**  
**Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas**



UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN  
CERRO DE PASCO  
FRENTE A LA OFICINA DE REGULACIÓN TÉCNICA  
FRENTE A LA OFICINA DE REGULACIÓN TÉCNICA  
FRENTE A LA OFICINA DE REGULACIÓN TÉCNICA



## **INFORME DE ORIGINALIDAD N° 079-2024**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

**Bach. Georje James ASTO QUISPE**

Escuela de Formación Profesional  
**Ingeniería de Minas**

Tipo de trabajo:  
**Tesis**

Título del trabajo  
**“Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.”**

Asesor:  
**Ing. Julio Cesar, SANTIAGO RIVERA**

Índice de Similitud: **14 %**

Calificativo  
**APROBADO**

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 20 de diciembre de 2024.

Sello y Firma del responsable  
de la Unidad de Investigación

## **DEDICATORIA**

A mi papá Hugo ASTO CORREA, por ser siempre mi ejemplo de fortaleza y sabiduría, y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Tu apoyo incondicional me ha permitido llegar hasta aquí, y este logro es tan tuyo como mío.

Y a mi querida Shisha, que con su lealtad y amor me acompañó en las largas noches de estudio, brindándome paz y alegría en los momentos más difíciles.

Tu presencia ha sido una bendición en este camino.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la culminación de esta tesis.

A mis profesores, por su dedicación, paciencia y sabiduría, que me guiaron durante todo este proceso. Especialmente a mi asesor, quien con sus valiosos consejos me ayudó a enfrentar los retos de esta investigación.

A la universidad, por brindarme el espacio académico y las herramientas necesarias para mi formación profesional.

Este trabajo es un reflejo del conocimiento adquirido en sus aulas.

## RESUMEN

En la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., propietaria de la Mina Tambomayo, se realizó la “Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo” con el objetivo de identificar las mejores opciones para la minería subterránea y dimensionar los componentes estructurales necesarios.

Para alcanzar este objetivo, se llevaron a cabo trabajos tanto de campo como de gabinete. En la primera etapa, el estudio se centró en la realización de investigaciones básicas, cuya finalidad fue recopilar la información necesaria para evaluar los principales factores que afectan la estabilidad y estimar los parámetros geomecánicos fundamentales. En la segunda etapa, se integró toda la información obtenida durante las investigaciones, lo que permitió evaluar las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas, para luego proporcionar recomendaciones sobre las alternativas de minado más adecuadas.

Como parte de las investigaciones iniciales, se definieron las condiciones naturales del yacimiento, se caracterizó y clasificó la masa rocosa mediante el mapeo geomecánico de las áreas subterráneas en estudio, así como a través del análisis geotécnico de los testigos obtenidos en sondajes diamantinos realizados en la exploración del yacimiento. Los resultados de esta caracterización condujeron a la zonificación geomecánica y a la determinación de las propiedades físicas y parámetros de resistencia de la roca intacta, las discontinuidades y la masa rocosa en su conjunto. Asimismo, se evaluaron factores adicionales que podrían afectar la estabilidad de las excavaciones mineras subterráneas, tales como la presencia de agua, los esfuerzos in-situ y los sismos.

**Palabras Clave:** Geomecánica, método de minado, parámetros geotécnicos.

## ABSTRACT

At Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., owner of the Tambomayo Mine, the "Geomechanical Evaluation to Determine the Mining Method of the Tambomayo Mine" was carried out with the aim of identifying the best options for underground mining and sizing the necessary structural components.

To achieve this objective, both field and cabinet work was carried out. In the first phase, the study focused on conducting basic research, the purpose of which was to collect the necessary information to assess the main factors affecting stability and to estimate the fundamental geomechanical parameters. In the second stage, all the information obtained during the investigations was integrated, which made it possible to evaluate the stability conditions of the underground excavations, and then provide recommendations on the most appropriate mining alternatives.

As part of the initial investigations, the natural conditions of the deposit were defined, the rock mass was characterized and classified through geomechanical mapping of the underground areas under study, as well as through the geotechnical analysis of the cores obtained in diamond drillings carried out in the exploration of the deposit. The results of this characterization led to geomechanical zoning and the determination of the physical properties and strength parameters of the intact rock, discontinuities, and rock mass as a whole. Additional factors that could affect the stability of underground mining excavations were also evaluated, such as the presence of water, in-situ stresses and earthquakes.

**Keywords:** Geomechanics, mining method, geotechnical parameters.

## INTRODUCCIÓN

La Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. encargó la realización de una Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo, la cual abarca dos fases:

- 1ra fase: Evaluación Geomecánica del Minado entre el Nivel 4540 y el Nivel 4840, que incluye las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte entre los Niveles 4540 y 4640, y únicamente la Veta Paola Norte entre los Niveles 4640 y 4840.
- 2da fase: Evaluación Geomecánica del Minado por encima del Nivel 4840.

En la primera etapa, los trabajos se enfocaron en la realización de investigaciones básicas para recopilar la información necesaria que permitiera evaluar los principales factores de control de estabilidad y, de esta manera, estimar los parámetros geomecánicos esenciales. Posteriormente, en una segunda etapa, se integró la información obtenida en las investigaciones preliminares para analizar las condiciones de estabilidad de las excavaciones relacionadas con el minado. Basándose en los resultados obtenidos en ambas etapas, se definió el método de minado en conjunto con Buenaventura y se dimensionaron los componentes estructurales necesarios, lo que permitió proponer las estrategias de minado finales.

# ÍNDICE

**Página.**

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

## CAPITULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema .....	1
1.2.	Delimitación de la investigación.....	2
1.2.1.	Ubicación .....	2
1.2.2.	Accesibilidad.....	2
1.2.3.	Geología Regional .....	3
1.2.4.	Geología estructural .....	6
1.2.5.	Geología local .....	7
1.2.6.	Geología económica.....	8
1.3.	Formulación del problema .....	9
1.3.1.	Problema general .....	9
1.3.2.	Problemas específicos .....	9
1.4.	Formulación de objetivos.....	9
1.4.1.	Objetivo general.....	9

1.4.2.	Objetivos específicos .....	9
1.5.	Justificación de la investigación .....	9
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	10

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio.....	11
2.2.	Bases teóricas - científicas .....	14
2.2.1.	Enfoque de la evaluación .....	14
2.2.2.	Aspectos técnicos .....	16
2.3.	Definición de términos básicos .....	18
2.4.	Formulación de hipótesis .....	21
2.4.1.	Hipótesis general.....	21
2.4.2.	Hipótesis específicas .....	21
2.5.	Identificación de las variables.....	21
2.5.1.	Variable independiente .....	21
2.5.2.	Variable dependiente .....	21
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores .....	22

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación.....	24
3.2.	Nivel de investigación.....	24
3.3.	Métodos de investigación .....	24
3.4.	Diseño de investigación .....	25
3.5.	Población y muestras .....	25
3.5.1.	Población.....	25

3.5.2.	Muestra .....	25
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	25
3.6.1.	Técnicas .....	25
3.6.2.	Instrumentos de recolección de datos .....	26
3.7.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	26
3.8.	Tratamiento estadístico .....	27
3.9.	Orientación ética filosófica y epistémica .....	27

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo .....	28
4.1.1.	Modelo Geomecánico .....	28
4.1.2.	Caracterización de la masa rocosa .....	30
4.1.3.	Clasificación de la masa rocosa .....	38
4.1.4.	Zonificación geomecánica de la masa rocosa .....	40
4.1.5.	Resistencia de la roca .....	46
4.1.6.	Condiciones del agua subterránea .....	55
4.1.7.	Esfuerzos in-situ .....	56
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados .....	59
4.2.1.	Consideraciones sobre las condiciones de estabilidad .....	59
4.2.2.	Aberturas máximas de las excavaciones y sostenimiento .....	60
4.2.3.	Tajeos .....	66
4.2.4.	Estabilidad estructuralmente controlada .....	73
4.2.5.	Estabilidad controlada por esfuerzos .....	76
4.3.	Prueba de hipótesis .....	78
4.4.	Discusión de resultados .....	78

4.4.1. Selección del método de minado .....	78
4.4.2. Métodos alternativos .....	81
4.4.3. Métodos de minado propuestos .....	83
4.4.4. Parámetros del Método de minado de Veta Paola Norte .....	85
4.4.5. Consideraciones Finales.....	89

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	<b>Página.</b>
Ilustración 1. Plano de ubicación de mina Tambomayo. ....	3
Ilustración 2. Ubicación de las secciones transversales, vista en planta.....	29
Ilustración 3. Diagrama estereográfico de contornos (compósito veta Mirtha).....	33
Ilustración 4. Diagrama estereográfico de planos principales (compósito veta Mirtha) .....	33
Ilustración 5. Diagrama de roseta (compósito veta Mirtha) .....	34
Ilustración 6. Ejemplo de Zonificación Geomecánica – Sección 040 .....	45
Ilustración 7. Ubicación de los datos obtenidos del WSM. ....	58
Ilustración 8. Orientación de los Esfuerzos Principales de los datos obtenidos del WSM.....	58
Ilustración 9. Guía para el sostenimiento de excavaciones permanentes (Grimstad y Barton, 1993) .....	62
Ilustración 10. Gráfico de Estabilidad para excavaciones del tipo ingreso del personal (Según Lang et.al., 1991). ....	65
Ilustración 11. Gráfico de estabilidad. Según Potvin (1988), modificado por Nickson (1992) .....	68
Ilustración 12. Estimación de potencias del mineral en veta Paola Norte, por secciones y niveles. Vista mirando al oeste .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página.</b>
Tabla 1. Operacionalización de Variables .....	22
Tabla 2. Operacionalización de la variable dependiente. ....	23
Tabla 3. Ubicación y secciones transversales típicas por zonas .....	29
Tabla 4. Sistemas de Discontinuidades Estructurales - (Rumbo/buzamiento – Dir. buzamiento/buzamiento).....	32
Tabla 5. Criterio para la Clasificación de la Masa Rocosa .....	39
Tabla 6. Calidad de la Masa Rocosa por Tipo de Roca .....	39
Tabla 7. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Mirtha .....	42
Tabla 8. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola .....	43
Tabla 9. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola Norte .....	44
Tabla 10. Resultados de los rangos de UCS según el martillo de Schmidt .....	47
Tabla 11. Resultados de ensayos de carga puntual (A) – Ref.: 15.....	48
Tabla 12. Resultados de los ensayos de carga puntual (B) – Ref.: 15 .....	49
Tabla 13. Resultados de ensayos de compresión uniaxial – Ref.: 15 .....	49
Tabla 14. Resultados de ensayos de compresión triaxial – Ref.: 15.....	50
Tabla 15. Resultados de ensayos de tracción indirecta – Ref.: 15.....	51
Tabla 16. Resultados de las propiedades físicas de la roca intacta – Ref.: 15 .....	52
Tabla 17. Valores de la cohesión y ángulo de fricción de las discontinuidades – Ref.: 15.....	53
Tabla 18. Parámetros de Resistencia de la Masa Rocosa .....	54
Tabla 19. Magnitud de los Esfuerzos in-situ. ....	57
Tabla 20. Aberturas máximas de las Excavaciones Permanentes.....	61
Tabla 21. Sostenimiento para labores de avance permanentes .....	63
Tabla 22. Sostenimiento para labores de avance temporales.....	64

Tabla 23. Aberturas máximas y tiempos de autosostenimiento para Tajeos .....	66
Tabla 24. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Mirtha.....	70
Tabla 25. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola.....	71
Tabla 26. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola Norte.....	72
Tabla 27. Métodos de Minado Subterráneo en orden de costos .....	80

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

En toda empresa minera se considera como proceso fundamental la Evaluación Geomecánica, como principal instrumento para lograr un control de las excavaciones y realizar el minado correspondiente cumpliendo con los estándares de la minería.

El método de minado debe estar aparejado a todas estas condiciones naturales del yacimiento, de tal manera que el minado sea técnicamente factible para asegurar una factibilidad técnica - económica óptima.

En este marco, se tiene que definir cada una de las condiciones naturales del yacimiento, en dónde los aspectos geomecánicos jugarán un rol preponderante desde el punto de vista técnico.

Como producto de los trabajos realizados como parte de la operación de la mina, Tambomayo nos proporcionó la información básica concerniente con la geología, morfología de la mineralización, reservas y distribución de leyes y con las condiciones hidrogeológicas del yacimiento. Esta información básica es la que se utilizó, para la evaluación realizada.

Por otro lado, para la evaluación geomecánica del yacimiento, en una primera etapa, se orientaron los trabajos a la ejecución de las investigaciones básicas, con el fin de obtener la información necesaria, que permita evaluar los factores principales de control de la estabilidad y estimar así los parámetros geomecánicos básicos.

En una segunda etapa, se integró la información obtenida durante las investigaciones básicas, con el fin de evaluar las condiciones de estabilidad de las excavaciones asociadas al minado.

Este proceso debe de ser realizado durante todo el proceso de explotación, para asegurar y garantizar la estabilidad de las labores subterráneas, objetivo principal del presente proyecto de investigación.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

### **1.2.1. Ubicación**

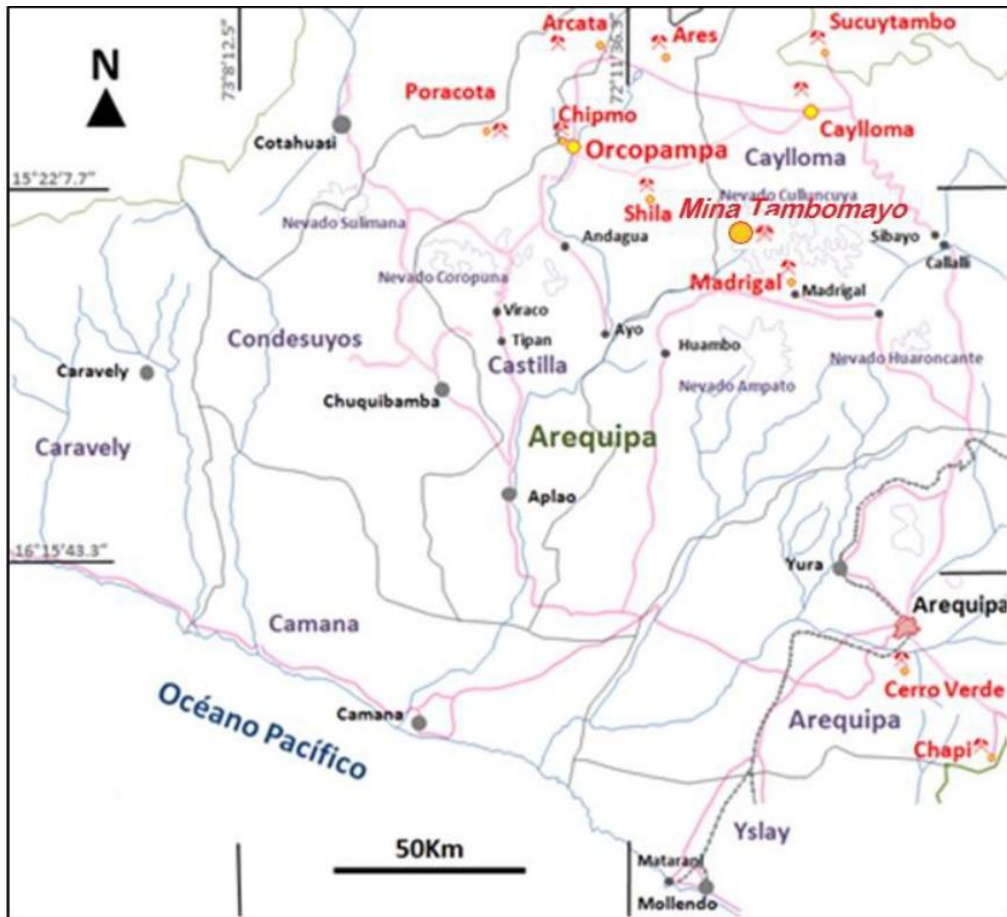
El área del Proyecto Tambomayo, está ubicado en el anexo Puna Chica del distrito de Tapay, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, a una altitud de 4700 a 4900 msnm y en las siguientes coordenadas UTM: 187,300 E y 8'287,600 N.

### **1.2.2. Accesibilidad.**

El acceso desde la ciudad de Lima se realiza a través de la ciudad de Arequipa, por vía aérea o por la Carretera Panamericana Sur, recorriendo 1025 km.

Desde Arequipa se toma la vía Yura – Cañahuas – Sibayo – Caylloma – desvío Talta Huarahuarco – Tambomayo, realizando un recorrido de 232 km. La carretera está asfaltada hasta el desvío al poblado de Chivay y el resto es una carretera afirmada.

**Ilustración 1** Plano de ubicación de mina Tambomayo.



Fuente: Elaboración propia

### 1.2.3. Geología Regional

A nivel regional, la columna litoestratigráfica del área incluye rocas del Precámbrico, Mesozoico (Jurásico-Cretácico), Cenozoico (Terciario-Cuaternario), así como pulsaciones de domo, cuerpos intrusivos menores y, finalmente, depósitos Cuaternarios.

El substrato precámbrico está compuesto por rocas metamórficas, como ortogneis y gneis granítico, que afloran principalmente en el lecho del río Colca y presentan estructuras delgadas (Caldas, J, 1993).

El Mesozoico está compuesto por rocas del Jurásico y Cretácico, representadas por el Grupo Yura, que aflora principalmente en el norte y sur del Proyecto

Tambomayo. Sobreyaciendo a estas unidades, se encuentran las Formaciones Murco y Arcurquina, respectivamente.

El Arco Volcánico Terciario-Cuaternario está constituido por los Volcánicos Santa Rosa (la formación más relevante por contener la mineralización de Tambomayo), Shila, Fullchuina, Alcaje, Kenko y Sahuarque. Encima de estas secuencias se ubica el Pliocuaternario, representado por los Depósitos Molloco, los Volcánicos Barroso y los Volcánicos Andagua.

La secuencia culmina con pulsaciones de domos de composición riodacítica y stocks subvolcánicos de composición andesítica a diorítica, localizados en los alrededores de la mina Tambomayo.

Hasta el momento, las estructuras reconocidas se encuentran en el borde de las calderas Limayoc y Surihuiri.

- **Formación Yura (Ki-yu)**

El Grupo Yura está representado por una serie sedimentaria, en general se puede establecer que los sedimentos corresponden a un mar de plataforma con corriente de alta movilidad poco profundo en la que se depositaron sedimentos terrígenos finos en la zona inferior.

El incremento de material detrítico grueso hacia la parte superior, supone un ambiente depositacional de menor profundidad y notables aportes. La presencia de calizas en la parte intermedia del grupo indica un ambiente depositacional de arrecifes en aguas someras.

- **Formación Murco (Ki-mu)**

Esta Formación está constituida en la zona inferior por calizas nodulares gris oscuras, en la zona media se compone de grauvacas de color violáceo intercaladas con areniscas conglomerádicas de color gris verdoso, hacia la zona superior media

se encuentran capas delgadas de areniscas de grano fino de color rojo ladrillo, finalmente en la zona superior areniscas grises de estratificación cruzada, que pasan a limolitas y lutitas rojas a violáceas.

- **Formación Arcurquina (Km-ar)**

En esta se pueden distinguir dos miembros, el inferior que consiste en calizas margosas gris azuladas en capas delgadas con intercalaciones de areniscas calcáreas amarillentas, el miembro superior que consiste de calizas azuladas brechoides, las cuales están asociadas con abundantes nódulos de chert, de coloración negro a marrón.

- **Volcánicos Santa Rosa (Mi-sr)**

Que representa al área del presente estudio, está conformado por brechas andesíticas, lavas, tobas y derrames volcánicos de composición dacítica.

- **Formación Ichocollo (Tm-ich)**

Está constituida por lavas y domos dacíticos en la base y en la zona superior lavas andesíticas a andesítico-basálticas con una coloración gris a gris oscura, con intercalaciones areniscosas y brechas andesíticas.

- **Formación Sencca (Tm-se)**

Está constituida por una serie tobas de naturaleza dacítica a riolítica de coloración crema a rosado de tipo efusivo y explosivo, intercaladas con clastos. Esta Formación yace, en discordancia angular a la Formación Orcopampa y subyace al Grupo Barroso.

- **Grupo Barroso (Qpl-ba-ev)**

En este grupo se han reconocido tres unidades: Volcánico Shila, Volcánico Barroso y Volcánico Purupurini. En la primera, su litología consiste en derrames lávicos de naturaleza andesítica variando a dacítica. La segunda, se caracteriza por

acumulaciones de formas dómicas compuestas por lavas andesíticas de textura afanítica de color gris azulada a rojizas. La tercera, consiste en derrames lávicos afaníticos, de composición similar a las anteriores unidades.

- **Depósito Molloco (Qpl-mo)**

El material que lo conforma consta de gravas, arenas y limos con matriz arenolimoso, en forma de capas groseramente estratificadas.

- **Grupo Andagua (Qr-an)**

Se describe a una unidad volcánica de reciente formación que se presenta a manera de pseudo-estratos y cono de escorias, también se han observado bombas que son los elementos que caracterizan a los aglomerados.

#### **1.2.4. Geología estructural**

Se han identificado estructuras correspondientes al Ciclo Andino, diferenciando las Fases Peruana e Incaica. Estas incluyen un levantamiento y la formación de pliegues con orientación NW-SE, lo que indica una compresión en dirección NE-SW, acompañada de fallas de rumbo y fallas conjugadas. La Fase Incaica provocó que algunos ejes de los pliegues rotaran hacia una posición E-W.

La Fase Quechua impactó los volcanes del grupo Tacaza, y se divide en dos etapas: la primera se caracteriza por plegamientos con rumbo NW-SE, mientras que la segunda presenta fracturamiento y fallamiento con orientaciones NW-SE y NE-SW. Por su parte, la Fase Pliocénica afectó a los volcanes de la Formación Sencca, donde se identificaron los centros volcánicos.

En la zona sur del Perú, la tectónica del Plioceno es de naturaleza compresiva. La subsidencia que originó la Caldera Caylloma fue resultado de procesos tectónicos y volcánicos.

El área de estudio está bajo un control estructural regional con rumbo andino NW-SE, lo que ha generado fallas tensionales en dirección E-W. Esta última es particularmente relevante debido a la presencia de mineralización.

### **1.2.5. Geología local**

Localmente el área de estudio está conformada por afloramientos de tufos, brechas, lavas y lahares que varían desde traquiandesitas hasta dacitas; los lahares de composición andesítica se evidencian en las zonas de elevación, y en las zonas de quebradas y depresiones rellenas de material cuaternario producto de la erosión.

El área de la mina Tambomayo está constituida por una larga y compleja secuencia eruptiva de secuencias volcánicas entre rocas efusivas, fragmentales, volcanoclásticas y depósitos de avalanchas (lahares) que en conjunto construyen un posible estrato volcán de varios kilómetros de diámetro.

En la Ilustración 3 se muestra la litología presente en la mina Tambomayo, teniendo lavas andesíticas, tobas andesíticas y toba brecha andesíticas, que son las principales rocas encajonante del yacimiento.

Se diferencian tres tipos predominantes de alteración.

- La alteración cuarzo – adularia, ocurre dentro de la estructura mineral y está siempre asociada a valores económicos. La silicificación se da en la estructura principal y en la caja piso teniendo un halo muy restringido.
- El segundo tipo de alteración es la argilización, que ocurre formando estrechos halos en ambas cajas de la estructura mineral con mayor predominancia en la caja techo de la veta, como también se presenta en la misma estructura mineral. En este tipo de alteración, por difracción de rayos X, se determinó la presencia de illita, y caolinita. }

- Alejándose de la estructura mineralizada, la alteración propilítica es de mayor desarrollo. En este tipo se incluyen una débil piritización y la ocurrencia de venillas de calcita

La Tectónica Pliocénica en la zona Sur del Perú es de naturaleza compresiva. La subsidencia ocurrida que dio origen a la Caldera Caylloma es consecuencia de los fenómenos tectónicos y volcánicos.

El área de estudio tiene un control estructural regional de rumbo Andino NW-SE que ha generado fallamientos tensionales con dirección E-W, este último es de mayor importancia por presentar la mineralización.

#### **1.2.6. Geología económica**

El yacimiento de mina Tambomayo consiste de vetas de origen epitermal de baja sulfuración a intermedia con cuarzo, trazas de adularia, sericita y pirita. La mineralización esta probablemente asociada a los domos de composición riódacita y cuerpos intrusivos pequeños a manera de stocks de composición diorita a andesita emplazado dentro y fuera de la Caldera Limayoc, Surihuiri y Caylloma.

Con los trabajos iniciales de exploración, reconocieron dos estructuras mineralizadas de Au-Ag, vetas sub paralelas de rumbo N75°W, con buzamientos variables entre los 65°- 80°N, estas son las vetas Mirtha y Olivia, siendo la primera la más importante. Una tercera veta denominada Paola ha sido reconocida en las labores subterráneas con rumbo N60°E y buzamiento promedio de 70°NW, pero ésta no aflora en superficie. Con los trabajos posteriores de laboreo minero y sondajes diamantinos, reconocieron las demás vetas que actualmente se conocen y que están en etapa de preparación y/o explotación.

A través de las labores subterráneas desarrolladas se han estimado recursos medidos e indicados de 1,934,980 tcs, con rangos de leyes de 8.78 g/t Ag, 12.79 g/t Au,

1.32 % Pb y 2.14 % Zn. Los recursos inferidos suman 315,432 tcs, con rangos de leyes de 5.46 g/t Ag, 8.67 g/t Au, 1.53 % Pb y 2.39 % Zn.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Es posible efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cómo influye la aplicación de la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo?
- b) ¿Cómo obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo?

### **1.4. Formulación de objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Aplicar la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo.
- b) Obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo.

### **1.5. Justificación de la investigación**

Para cumplir con el objetivo mencionado, fue necesario realizar trabajos de campo y de gabinete. En una primera etapa el estudio estuvo orientado a la ejecución de investigaciones básicas, con el fin de obtener la información necesaria, que permitió evaluar los factores principales del control de la estabilidad, y estimar los parámetros

geomecánicos básicos. En una segunda etapa, se integró la información obtenida durante las investigaciones básicas, con el fin de evaluar las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas, para finalmente dar las recomendaciones sobre las alternativas del minado.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

En todo proceso se tiene limitaciones como puede ser la falta de información, los costos, el tiempo, las cuales se van eliminando gestionando durante el periodo de efectuada la investigación, solicitando apoyo de la empresa y del personal involucrado de alguna manera con la investigación. Vale referir el incondicional apoyo del personal y el valioso aporte de la empresa en todo lo requerido para llevar a buen fin el presente proyecto de investigación.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **a) Antecedentes nacionales.**

- (Condori N., 2017), de la Universidad Nacional del Altiplano, presentó la tesis “Evaluación geomecánica y estabilidad de labores en el proyecto San Gabriel CIA de minas Buenaventura” El presente estudio de investigación es de suma importancia la mecánica de rocas o más ampliamente la geomecánica, tal como se le conoce en la actualidad, es una disciplina que en los últimos años ha tenido grandes progresos, convirtiéndose en una herramienta tecnológica más en la industria minera en particular y en otras ramas de la ingeniería en general. Para su aplicación efectiva en la evaluación geomecánica y estabilidad de labores subterráneas, a donde se dirige la presente tesis, las actividades geomecánicas que se realizan en una mina deben ser conducidas en un medio ambiente organizacional que permita la integración de conceptos, información y actividad analítica de parte de todo el personal involucrado con la explotación de la mina. La ejecución de esta investigación ha sido con el

objetivo de evaluar las características geomecánicas y la estabilidad de las labores en el proyecto San Gabriel CIA de minas Buenaventura, es decir, las condiciones geomecánicas del sitio y así determinar la estabilidad de las excavaciones de labores subterráneas. Respondiendo a la hipótesis planteada en la investigación, se tiene como resultados característicos de macizo rocoso desde regular a buena calidad, con esta información se procedió a determinar la estabilidad de las excavaciones a través de gráficos empíricos y finalmente se realizó un análisis numérico de esfuerzo deformación. Las excavaciones de sección 3.5 x 3.5 m como son las Cortadas de exploración en gran parte no requerirán sostenimiento, sin embargo, de presentarse un terreno de mala calidad será necesaria la evaluación de sostenimiento. Las excavaciones de sección 4.5 x 4.5 m como es el caso de la Rampa San Gabriel, requerirá un sostenimiento de tipo permanente que puede ser pernos helicoidales distribuidos de manera sistemática y finalmente las excavaciones de sección 7.0 x 7.0 m destinadas a ser Cámaras de perforación diamantina requerirán un sostenimiento más robusto como es el caso del Shotcrete mas empernado sistemático.

- **(Rio R., 2019)**, de la Universidad Nacional Federico Villareal, desarrolla la tesis “Evaluación geomecánica para la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros “Los Ángeles” El presente trabajo de investigación aborda el desarrollo de evaluación geomecánica para la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros “Los Ángeles” en función del factor de seguridad y los costos unitarios de sostenimiento. La investigación fue desarrollada en el emplazamiento de los túneles carreteros proyectados, los cuales se ubican en

los distritos de Lurigancho – Chosica y Ricardo Palma, en las provincias de Lima y Huarochirí, departamento de Lima, el proyecto de los túneles atraviesa el Batolito de la Costa Peruana, consta de 02 túneles (eje 01 y eje 02), los cuales son paralelos entre sí (gemelos) de 12 960m y 13 000m, respectivamente. Tiene como objetivos determinar la influencia de la evaluación geomecánica en la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros “Los Ángeles”, para lo cual se estableció 13 estaciones geomecánicas tomando datos a lo largo de los ejes, luego, se procedió a hacer uso de las clasificaciones geomecánicas obteniendo roca del tipo II y III, según Bieniawski; y roca media y buena, según Barton. Asimismo, se utilizaron las recomendaciones de sostenimientos según el tipo de roca propuestas por cada autor. Se determinaron las familias de diaclasas más representativas en cada estación geomecánica mediante el software Dips V.5.1. Se evaluó cómo influye el factor de seguridad en el sostenimiento del macizo rocoso en los túneles, mediante el software Phase 2 V.8.0, para este caso se eligió el criterio de rotura de Hoek – Brown al tratarse de roca, los resultados mostraron que el más costoso y sobredimensionado estructuralmente fue el de Bieniawski, mientras que Barton fue el más acertado, cumpliendo con los factores de seguridad establecidos por la norma, siendo éste, el más económico y viable. Por lo tanto, para esta investigación las recomendaciones por Barton se ajustan mejor a la realidad peruana (técnico – económico) debido al gasto público que ejerce el estado en este tipo de obras. Finalmente, se llegó a la conclusión de que todas las hipótesis planteadas estaban en lo cierto.

## **b) Antecedentes internacionales**

- **(Arancibia , 2011)**, Arancibia (1998), en su tesis titulada Evaluación de la estabilidad geomecánica en grandes minas subterráneas en Chile, exploró las metodologías de clasificación geomecánica implementadas en el país a partir de la década de 1970. La investigación destacó la adopción de sistemas como el Índice de Calidad de Roca (RMR) de Bieniawski y el Sistema Q, que fueron utilizados en operaciones mineras de gran escala, como El Teniente y Chuquicamata, para evaluar la estabilidad de los macizos rocosos. La investigación de Arancibia enfatizó la necesidad de adaptar estas metodologías a las condiciones específicas de las minas subterráneas chilenas, considerando factores como la profundidad y las tensiones inducidas.
- **(Martinez, 2017)**, en su tesis titulada Evaluación geomecánica de macizos rocosos en proyectos mineros de Argentina, investigó el uso de sistemas de clasificación geomecánica como el RMR y el Sistema Q en minas argentinas. Su estudio destacó la relevancia de adaptar estos sistemas a las características geológicas locales, especialmente en minas ubicadas en regiones montañosas. Martínez también exploró el uso de tecnologías de modelado numérico tridimensional para predecir el comportamiento del macizo rocoso bajo diversas condiciones operativas, ofreciendo valiosos aportes para mejorar la seguridad y eficiencia en la minería subterránea de la región.

## **2.2. Bases teóricas - científicas**

### **2.2.1. Enfoque de la evaluación**

Para evaluar un método de minado, es importante definir claramente las condiciones naturales del yacimiento, es decir:

- La geología del yacimiento

- La morfología de la mineralización
- Las reservas y distribución de leyes
- Las condiciones geomecánicas de las rocas del yacimiento
- Las condiciones hidrogeológicas del mismo.

El método (o métodos) de minado debe(n) estar aparejado(s) a todas estas condiciones naturales del yacimiento, de tal manera que el minado sea técnicamente factible. La factibilidad técnica debe ser complementada por Volcán con una evaluación económica del método (o métodos) de minado, para asegurar una factibilidad técnica – económica óptima.

En este marco, se tiene que definir cada una de las condiciones naturales del yacimiento, en dónde los aspectos geomecánicos jugarán un rol preponderante desde el punto de vista técnico. Como producto de los trabajos realizados como parte de la operación de la mina, Volcán suministró la información básica concerniente con la geología, morfología de la mineralización, reservas y distribución de leyes y con las condiciones hidrogeológicas del yacimiento. Esta información básica es la que se utilizó, para la evaluación realizada.

Por otro lado, para la evaluación geomecánica del yacimiento, en una primera etapa, se orientaron los trabajos a la ejecución de investigaciones básicas, con el fin de obtener la información necesaria, que permita evaluar los factores principales de control de la estabilidad y estimar así los parámetros geomecánicos básicos.

En una segunda etapa, se integró la información obtenida durante las investigaciones básicas, con el fin de evaluar las condiciones de estabilidad de las excavaciones asociadas al minado.

Según los resultados que se obtuvieron en las dos etapas precedentes, se evaluaron los métodos de minado y se dimensionaron los diferentes componentes estructurales asociados al minado, planteándose al final las estrategias de minado.

### **2.2.2. Aspectos técnicos**

Los aspectos técnicos materia de la presente evaluación fueron los siguientes:

Investigaciones básicas:

- Se definieron las condiciones naturales del yacimiento, en base a la información desarrollada y proporcionada por Volcán.
- Se caracterizó a la masa rocosa del yacimiento, en base a la revisión y análisis de la información que se tuvo disponible y en base al mapeo geomecánico de la masa rocosa de las labores subterráneas de Mina Carahuacra. Para ello, se han utilizado las normas sugeridas por la ISRM (International Society for Rock Mechanics).
- Se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de la roca intacta, de las discontinuidades y de la masa rocosa, utilizando para ello procedimientos alternativos, según normas del ISRM.
- Las alternativas para determinar las propiedades físico mecánicas de la roca fueron: ejecución de ensayos con el martillo de geólogo, ejecución de ensayos de impacto con el martillo Schmidt, ejecución de ensayos de laboratorio, y, utilización del criterio de Hoek & Brown (1990, 2006) para estimar los parámetros de resistencia de la roca intacta y de la masa rocosa.
- Se determinó la calidad de la masa rocosa involucrada en el área de evaluación,
- mediante la aplicación de criterios de clasificación geomecánica, como los de
- Bieniawski (1989), Barton (1974) y Hoek & Marinos (2000).

- Se llevó a cabo una zonificación geomecánica del yacimiento, a fin de determinar los dominios estructurales en base a la información obtenida en los puntos precedentes.
- Se aprovechó toda la información disponible de las fuentes antes indicadas.
- Se evaluaron los factores adicionales, propios del yacimiento, que podrían influir en las condiciones de estabilidad de las labores mineras subterráneas (agua y esfuerzos).

#### **Evaluación de las condiciones de estabilidad de las excavaciones:**

- Se analizaron las condiciones de estabilidad de la masa rocosa de las excavaciones: dirección preferencial de avance de las excavaciones, abiertos máximos, tiempos de autosostenimiento, y la influencia de las discontinuidades estructurales y de los esfuerzos en las condiciones de estabilidad.
- Se hizo uso de modelamientos numéricos en función de los mecanismos de falla potencial del terreno para analizar la estabilidad de las excavaciones y cualquier otro componente asociado al minado.
- Todos los parámetros que se establecieron y las conclusiones que se obtuvieron, tienen el respectivo sustento técnico, los mismos que serán presentados en el presente trabajo de investigación.

#### **Evaluación de los métodos de minado**

- Con la información previamente desarrollada y en forma conjunta con el personal de Planeamiento y Diseño de Volcan se evaluaron los métodos de minado.

#### **Dimensionamiento y estrategias de minado:**

- De acuerdo al método o alternativas de métodos de minado evaluados se dimensionaron para cada método alternativo sus diferentes componentes estructurales asociados a los mismos.

- Se definió la ubicación de las principales excavaciones de acceso y servicios de carácter permanente.
- Se definieron los esquemas y las secuencias de avance del minado, de tal manera de maximizar la recuperación de las reservas y lograr adecuadas condiciones de estabilidad local y global.
- Se evaluaron los requerimientos de sostenimiento de las labores mineras y se definieron los elementos de sostenimiento más adecuados para las condiciones geomecánicas encontradas.
- Se evaluaron las necesidades de relleno a utilizarse en el minado del yacimiento.
- En general se dan recomendaciones sobre las técnicas de control de la estabilidad de las excavaciones asociadas al minado para que este sea seguro y eficiente.

### 2.3. Definición de términos básicos

- **Apertura:** Es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de abierto que ésta presenta. A menor apertura, las condiciones de la masa rocosa serán mejores ya mayor apertura, las condiciones serán más desfavorables.
- **Contactos litológicos:** Que comúnmente forman, por ejemplo, la caja techo y caja piso de una veta.
- **Diaclasas:** También denominadas juntas, son fracturas que no han tenido desplazamiento y las que comúnmente se presentan en la masa rocosa.
- **Discontinuidad:** Es un área de separación detectable metrológicamente dentro de los cuerpos rocosos cercanos a la superficie o en regiones más profundas de la corteza terrestre y el manto.
- **Discordancia:** Una superficie geológica que separa las rocas más antiguas de las rocas más modernas.

- **Espaciado:** Es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Éste determina el tamaño de los bloques de roca intacta. Cuanto menos espaciado tengan, los bloques serán más pequeños y cuanto más espaciado tengan, los bloques serán más grandes.
- **Estratificación:** Es una superficie característica de rocas sedimentarias que separa capas de igual o diferente litología. Estas rocas también pueden estar presentes en rocas que hayan originado por metamorfismo de rocas sedimentarios.
- **Fallas:** Son fracturas que han tenido desplazamiento. Estas son fracturas menores que representan en áreas locales de la mina o estructuras muy importantes que pueden atravesar toda la mina.
- **Investigaciones Geotécnicas.** - Es un programa de investigaciones geotécnicas por medio de perforaciones diamantinas, a fin de obtener parámetros y características hidrogeológicas de los materiales presentes en la zona de estudio.
- **Matriz rocosa.** - Material rocoso sin discontinuidades o bloques de roca intacta entre discontinuidades (muestra de mano o mayor). A pesar de considerarse continua es heterogénea y anisótropa, ligada a la fábrica, textura y estructura, mineral.
- **Orientación:** Es la posición de la discontinuidad en el espacio y es descrito por su rumbo y buzamiento. Cuando un grupo de discontinuidades se presentan con similar orientación son aproximadamente paralelas, se dice que éstas forman un “sistema” o una “familia” de discontinuidades.
- **Persistencia:** Es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad. Cuanto menor sea la persistencia, la masa rocosa será más estable y cuanto mayor sea ésta, será menos estable.

- **Perfil geotectónico:** Es el conjunto de actividades que comprende la investigación del subsuelo los análisis y recomendaciones para el diseño y construcción en el subsuelo.
- **Perfil litológico:** Es la parte de la geología que estudia la composición y estructura de las rocas, como su tamaño de grano, características físicas y químicas, estructuras metamórficas, etc. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte, así como su composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.
- **Perforación:** es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es abrir en la roca huecos cilíndricos denominados taladros y están destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores.
- **Pliques:** Son estructuras en las cuales los estratos se presentan curvados., son intrusiones de roca ígnea de forma tabular, que se presentan generalmente empinadas o verticales.
- **Productividad.** - Es la relación entre la cantidad de bienes y servicios producidos y la cantidad de recursos utilizados.
- **Rugosidad:** Es la aspereza o irregularidad de la superficie de la discontinuidad. Cuanta menor rugosidad tenga una discontinuidad, la masa rocosa será menos competente y cuanto mayor sea ésta, la masa rocosa será más competente.
- **Relleno:** Son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando éstos son más duros, ésta es más competente.
- **Sostenimiento:** En toda explotación minera, el sostenimiento de las labores es un trabajo adicional de alto costo que reduce la velocidad de avance y/o producción

pero que a la vez es un proceso esencial para proteger de accidentes a personal y al equipo.

- **Zonas de corte:** Son bandas de material que pueden ser de varios metros de espesor, en donde ha ocurrido fallamiento de la roca.
- **Zonificación geomecánica.** - Proceso de delimitación de zonas en donde la masa rocosa tiene condiciones geomecánicas similares y por lo tanto también comportamiento similar.

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Con la Evaluación Geomecánica se determinará el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a) Con la aplicación de la evaluación geomecánica se realizará la explotación de la Mina Tambomayo.
- b) Con los Parámetros Geotécnicos, realizaremos un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo.

## **2.5. Identificación de las variables**

### **2.5.1. Variable independiente**

X: Evaluación Geomecánica de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

### **2.5.2. Variable dependiente**

Y: Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

**Tabla 1** Operacionalización de Variables

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
VARIABLE INDEPENDIENTE	X: Evaluación Geomecánica de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	<p>La evaluación geomecánica del yacimiento, en una primera etapa, se orientaron los trabajos a la ejecución de las investigaciones básicas, con el fin de obtener la información necesaria, que permita evaluar los factores principales de control de la estabilidad y estimar así los parámetros geomecánicos básicos.</p> <p>En una segunda etapa, se integró la información obtenida durante las investigaciones básicas, con el fin de evaluar las condiciones de estabilidad de las excavaciones asociadas al minado.</p> <p>Este proceso debe de ser realizado durante todo el proceso de explotación, para asegurar y garantizar la estabilidad de las labores subterráneas, objetivo principal del presente proyecto de investigación.</p>	Evaluación	Mina Tambomayo
				Compañía de Minas Buenaventura.
			Identificación	Método de Minado
				Sostenimiento.
				Ciclo de Minado
			Operaciones	Zonificación de la mina.
Parámetros Geotécnicos.				

**Tabla 2** Operacionalización de la variable dependiente.

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
VARIABLE DEPENDIENTE	Y: Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Para cumplir con el objetivo mencionado, fue necesario realizar trabajos de campo y de gabinete. En una primera etapa el estudio estuvo orientado a la ejecución de investigaciones básicas, con el fin de obtener la información necesaria, que permitió evaluar los factores principales del control de la estabilidad, y estimar los parámetros geomecánicos básicos. En una segunda etapa, se integró la información obtenida durante las investigaciones básicas, con el fin de evaluar las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas, para finalmente dar las recomendaciones sobre las alternativas del minado.	Mapeo	Mapeo Geológico.
				Mapeo Geomecánico.
				Mapeo Estructural.
			Diseño	Mallas por tipo de roca.
				Tabla Geomecánica.
				Paneles de zonificación.
			Control	Labores de riesgo.
				Tajeos.
				Relleno.
			Sostenimiento	Tipo de roca
				Tiempo de auto sostenimiento
				Equipos de sostenimiento.

Fuente: Elaboración Propia

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

Se aplica los tipos de investigación cuantitativa:

- 1. Investigación descriptiva
- 2. Investigación analítica
- 3. Investigación experimental
- 4. Investigación cuasi experimental

De acuerdo a los objetivos es de carácter experimental-aplicativo obtenidos en los trabajos de campo y los análisis realizados para su realización.

#### **3.2. Nivel de investigación**

El Nivel de Investigación es Evaluativa

#### **3.3. Métodos de investigación**

El método de investigación se da de acuerdo a la investigación realizada y que ayudan a determinar el proceso.

- Experimento.
- Observación.

- Entrevistas personales.
- Información proporcionada por Mina Tambomayo
- Encuestas al personal involucrada en la investigación.

### **3.4. Diseño de investigación**

El diseño de investigación corresponde a la investigación cuantitativa, Descriptiva, experimental, en la cual se detalla la Evaluación Geomecánica efectuada en la Mina Tambomayo y los resultados obtenidos en la investigación.

1. Descripción del proceso
2. Preparación del proyecto de investigación.
3. Métodos y técnicas aplicadas en el estudio.
4. Ejecución del trabajo de campo.
5. Procesos de clasificación, codificación y mejoramiento.

### **3.5. Población y muestras**

#### **3.5.1. Población**

La población conformada por todos los colaboradores de la Mina Tambomayo, ya que la evaluación realizada involucra a toda la empresa por ser de vital importancia en todos los trabajos de la explotación y desarrollo de la mina.

#### **3.5.2. Muestra**

La muestra se da en el estudio geológico, minero y estadístico de la mina, durante el tiempo de realizado el proceso de excavación, lo cual nos permitió tener de cerca la información de lo desarrollado en la mina y todas las operaciones que se están realizado.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **3.6.1. Técnicas**

##### **Descripción de las técnicas empleadas**

- **Recopilación y análisis de data**

Información de la data de la Mina Tambomayo.

Aportes del personal de la mina.

Trabajo de campo.

Referencias encontradas con respecto a la Investigación.

- **Observación directa y toma de datos**

Se efectuó un recorrido por todas las labores de la mina Tambomayo, permitiéndonos obtener una información visual in situ de toda la mina, que fue de gran ayuda en nuestra evaluación.

- **Búsqueda de información bibliográfica**

El principal aporte bibliográfico lo obtuvimos de la data de la empresa, información obtenida del internet, libros de aportes para nuestra evolución geomecánica.

### **3.6.2. Instrumentos de recolección de datos**

#### **Materiales**

- Mapeadores.
- Brújula.
- Estación Total.
- Planos Topográficos.
- Simuladores
- Equipo de seguridad
- Computadora personal y Impresoras
- Cámara Fotográfica

### **3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

- Recopilación de datos

- En todas las labores subterráneas de la mina.
- Observación directa del proceso
- Observaciones directas en todas las labores subterráneas de la mina y toma de datos de campo.
- Búsqueda de información bibliográfica.
- Información proporcionada por la gerencia de la Mina Tambomayo.

### **3.8. Tratamiento estadístico**

Todo el proceso estadístico se realizó en Microsoft Excel y el SPSS. (software estadístico).

### **3.9. Orientación ética filosófica y epistémica**

La investigación se efectuó teniendo en consideración los principios de la ética personal y profesional, permitiéndonos detallar toda la información obtenida en todo el estudio realizado en la presente investigación.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

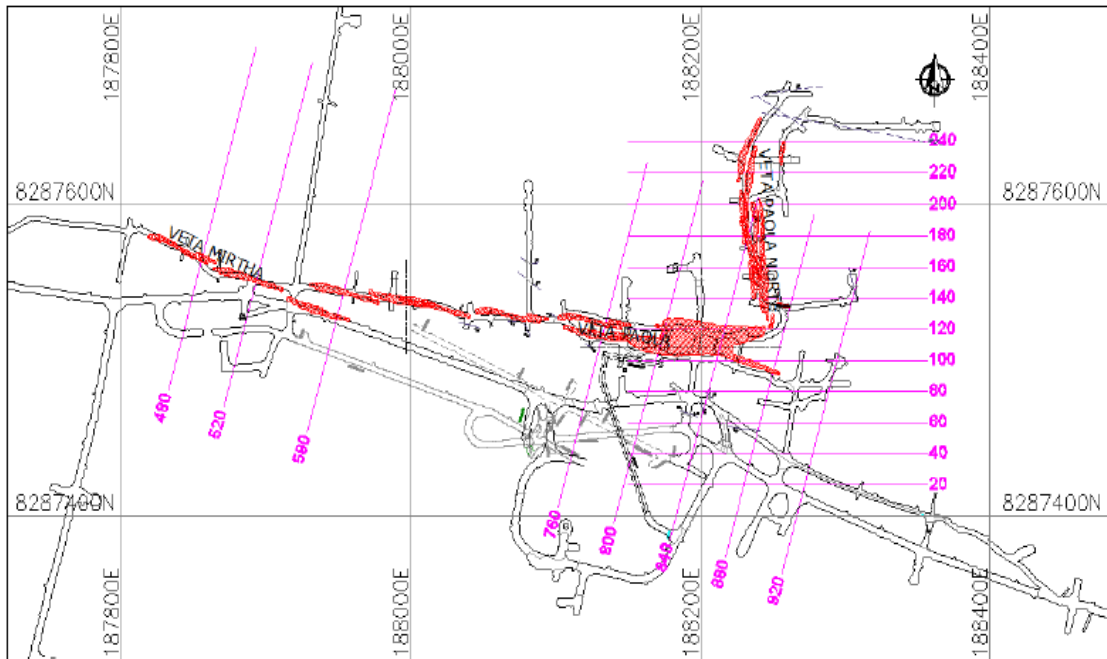
#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

##### **4.1.1. Modelo Geomecánico**

La presente evaluación geomecánica está enfocada a 3 zonas de estudio: vetas Mirtha, Paola y Paola Norte. Para el caso de la veta Mirtha el minado comprende los niveles Nv 4540 a Nv 4640 y también el minado entre los niveles Nv 4840 a Nv 4940. Para la veta Paola, el objetivo del estudio abarca entre los niveles Nv 4640 a Nv 4840. Finalmente, para el caso de la veta Paola Norte, la evaluación del minado se desarrollará entre los niveles Nv 4540 a Nv 4840.

En la imagen se muestran la ubicación en planta y las secciones transversales empleadas por cada una de las zonas en estudio (UTM Zona 19L WGS). En total, para mostrar los resultados obtenidos se han usado 20 secciones transversales típicas. Además, el cuadro contiene la orientación y el resumen de las secciones empleadas por cada zona, la cuarta columna muestra el rango de cota referencial objeto de estudio.

**Ilustración 2** Ubicación de las secciones transversales, vista en planta



Fuente: C. M. Buenaventura

Orientado a ejecución de investigaciones básicas (mapeo litológico estructural y geomecánico de afloramientos rocosos en superficie e interior mina, mediante aplicaciones del método Celdas de Detalle. En esta fase también se han realizado ensayos de campo y laboratorio para obtener información de interés que permita evaluar con mayores elementos de juicio los principales factores que controlan la estabilidad de la masa rocosa a nivel de dominios geomecánico.

**Tabla 3.** Ubicación y secciones transversales típicas por zonas

Zona (Veta)	Azimut	Vista	Rango de Cota Referencial	Sección Transversal
Mirtha	016°	NW	4640 – 4890	480, 520, 580, 760, 800, 840, 880 y 920.
Paola	016°	NW	4540 - 4740	760, 800, 840, 880 y 920.
Paola Norte	090°	N	4540 - 4890	020, 040, 060, 080, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 y 240.

#### **4.1.2. Caracterización de la masa rocosa**

El registro de la información geomecánica se efectuó a partir del mapeo geomecánico de la masa rocosa expuesta en las excavaciones mineras de los distintos niveles y subniveles de la mina, tanto para las zonas de las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte. La otra fuente de información ha sido del logueo geotécnico de los testigos rocosos de los diferentes sondajes diamantinos ejecutados como parte de los trabajos de exploración del yacimiento. Por otro lado, se aprovechó toda la información de interés desarrollada por el Departamento de Geología de la mina y también de información de evaluaciones geomecánicas anteriores.

El mapeo geotécnico de la masa rocosa expuesta en las labores subterráneas, se llevó a cabo utilizando el "método directo por celdas de detalle". Mediante este método se realizaron mediciones sistemáticas de las discontinuidades presentes en 93 estaciones de medición distribuidas en los distintos niveles de la mina, representadas cada una de ellas por un área de extensión variable de la roca expuesta. La ubicación de las estaciones de medición se muestra en los planos de zonificación geomecánica de planta (ver Láminas 10 a 27).

Los parámetros de observación y medición del mapeo geomecánico de afloramientos fueron obtenidos en formatos de registro diseñado para este propósito, adecuándolos a las normas sugeridas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), que se muestran en el Anexo 1. Estos parámetros fueron: tipo de roca, tipo de sistema de discontinuidad, orientación, espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno, espesor del relleno, intemperización y presencia de agua. Adicionalmente se registraron datos de resistencia y del grado de fracturamiento (RQD) de la roca.

En los testigos rocosos de las perforaciones diamantinas, el logueo geotécnico se llevó a cabo por métodos convencionales en formatos adecuados también a las normas ISRM (Anexo 2), con similares parámetros de observación y medición que los mencionados en el párrafo precedente. En total se llevó a cabo el logueo de 26 sondajes diamantinos con una longitud total de 1,820 m, haciéndose en mucho de ellos solo el tramo de interés cercano a las vetas.

### ***Aspectos Litológicos***

Las características litológicas simplificadas de la masa rocosa involucrada con las distintas vetas son las siguientes: para el caso de las vetas Mirtha, Paola y Paola Techo, el mineral se halla dentro de una brecha de cuarzo, estando el mineral de mejor ley en la brecha de cuarzo gris, la caja techo está conformada por tobas andesíticas y toba brecha andesítica, hacia la caja piso se observa la presencia de lavas andesíticas. Para el caso de la veta Paola Norte la mineralización es similar, la caja techo y piso es por lo general toba andesítica y toba brecha andesítica ya que esta veta se halla hacia el norte de la falla Norte y la veta Mirtha.

### ***Distribución de Discontinuidades***

Para establecer las características de distribución de discontinuidades o arreglo estructural de la masa rocosa, se procesaron los datos orientacionales mediante técnicas estereográficas, utilizando la versión avanzada del programa de cómputo DIPS (1995), elaborado por M.S. Diederichs y E. Hoek del Grupo de Ingeniería de Rocas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Toronto (Canadá), y también la versión 5.103 de Rocscience Inc. (2004). La primera versión se utilizó por las facilidades gráficas que ésta presenta.

Se ha realizado una interpretación de los datos estructurales, por un lado, de la información estructural obtenida del mapeo geomecánico de las distintas estaciones y

por otro lado, de las discontinuidades registradas de los planos geológicos de los distintos niveles que fueron realizados por el personal de geología de la mina.

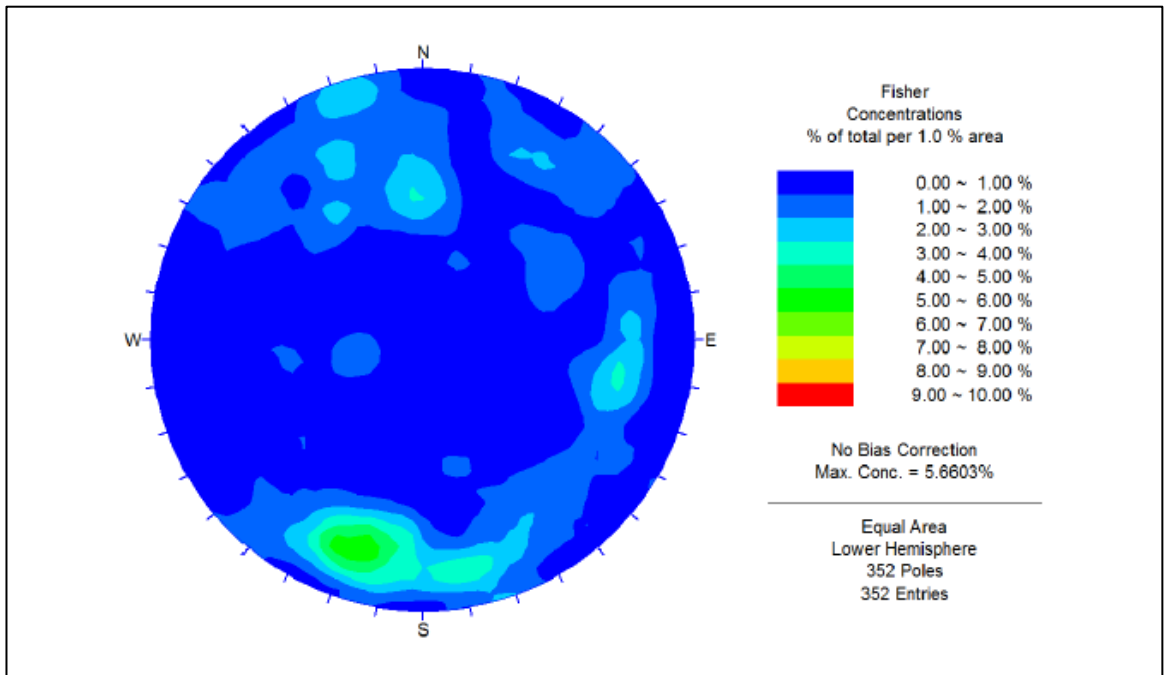
A manera de ejemplo, en las Ilustraciones 5, 6, 7 se presentan la distribución de las discontinuidades registradas en el compósito de discontinuidades encontradas para la veta Mirtha.

Un resumen de estos resultados se presenta en la Tabla 4 y en el Anexo 2 el detalle de la estereografía de las tres vetas en estudio y sus entornos: Mirtha, Paola y Paola Norte.

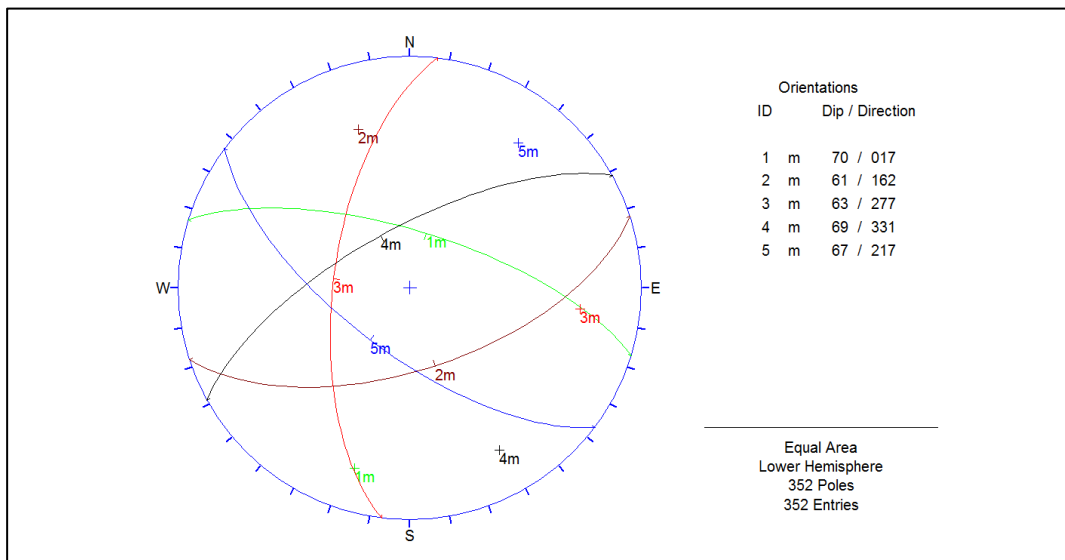
**Tabla 4** *Sistemas de Discontinuidades Estructurales - (Rumbo/buzamiento – Dir. buzamiento/buzamiento)*

Veta	Sector	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5
Mirtha	Caja Techo	N87°W/73°NE	N82°W/75°SW	N04°W/42°NE	N12°E/55°NW	---
		003°/73°	188°/75°	086°/42°	282°/55°	---
	Caja Piso	N75°W/69°NE	N71°E/60°SE	N05°E/64°NW	N59°E/69°NW	N49°W/72°SW
		015°/69°	161°/60°	275°/64°	329°/69°	221°/72°
Paola	Caja Techo	N87°E/63°NW	N84°E/65°SE	N33°W/71°SW	N35°W/61°NE	N10°E/37°SE
		357°/63°	174°/65°	237°/71°	055°/61°	100°/37°
	Mineral	N60°E/57°NW	N80°E/76°SE	N24°W/64°NE	N36°E/62°SE	---
		330°/57°	170°/76°	066°/64°	126°/62°	---
	Caja Piso	N84°W/74°NE	N81°W/67°SW	N09°E/68°NW	N21°E/65°SE	N31°W/65°NE
		006°/74°	189°/67°	279°/68°	111°/65°	059°/65°
Paola Norte	Caja Techo	N06°E/68°SE	N31°W/68°NE	N07°W/72°SW	N76°W/74°NE	N55°W/63°SW
		096°/68°	059°/68°	263°/72°	014°/74°	215°/63°
	Mineral	N14°W/51°NE	N58°E/78°NW	N77°E/79°SE	---	---
		076°/51°	328°/78°	167°/79°	---	---
	Caja Piso	N13°W/54°NE	N48°E/76°NW	N69°E/74°SE	N86°W/74°NE	N32°W/73°SW
		077°/54°	318°/76°	159°/74°	004°/74°	238°/73°

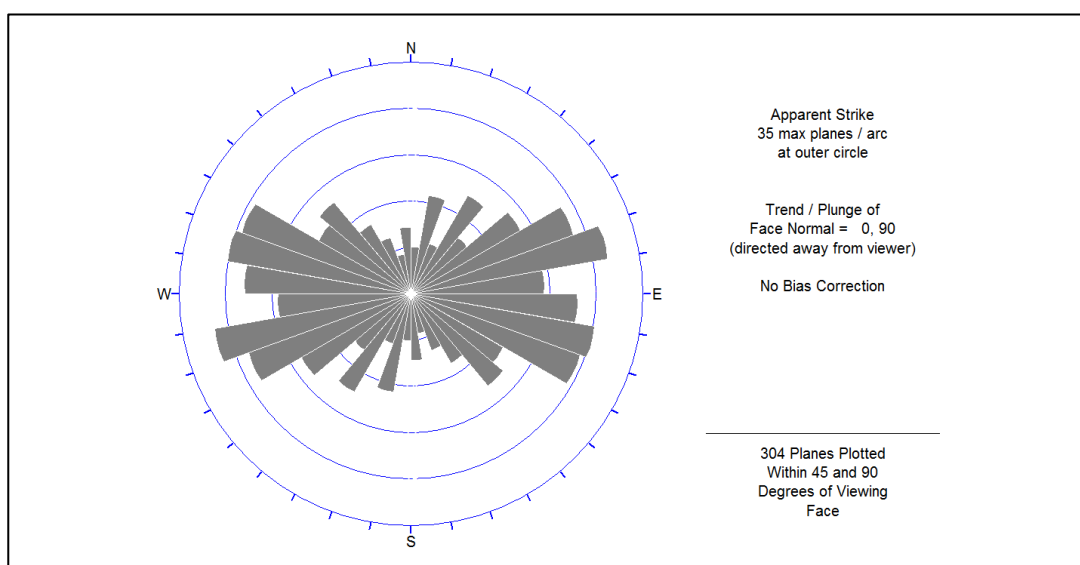
**Ilustración 3** Diagrama estereográfico de contornos (compósito veta Mirtha)



**Ilustración 4** Diagrama estereográfico de planos principales (compósito veta Mirtha)



**Ilustración 5** Diagrama de roseta (compósito veta Mirtha)



El análisis realizado es producto de toda la información que se ha registrado y se ha tenido disponible, además según lo revisado de los planos geológicos disponibles, el arreglo estructural encontrado es concordante con lo existente en los planos. Por otro lado, se revisó la información estructural establecida en estudios geomecánicos previos (Ref.: 15), los resultados mostrados en aquel entonces también guardan relación con lo determinado para la presente evaluación. De los resultados encontrados podemos señalar lo siguiente:

➤ **Veta Mirtha**

- En el caso del mineral y la caja techo, se observa la presencia de un sistema principal Sistema 1 que es paralelo al alineamiento de la veta y que tiene rumbo aproximado EW con alto buzamiento al N. Un segundo sistema principal Sistema 2 tiene el mismo rumbo, pero de buzamiento contrario.
- En este mismo sector, hay otros dos sistemas secundarios, Sistema 3 y Sistema 4, que tienen ambos, rumbo NS con buzamiento moderado tanto al E y W respectivamente. Para el caso de la caja piso existe un sistema principal

Sistema 1 casi EW con alto buzamiento al N, este sistema está asociado al rumbo de la veta. Un segundo sistema principal Sistema 2 tienen rumbo NEE con moderado buzamiento al SE.

- En la caja piso, el tercer sistema principal Sistema 3 tiene rumbo NS con alto buzamiento al W. Los otros sistemas secundarios tienen rumbo NE y NW con altos buzamientos al NW y SW respectivamente.

➤ **Veta Paola**

- En la caja techo se aprecia la presencia de dos sistemas principales, de los cuales el Sistema 1 siempre es paralelo al alineamiento de la veta con rumbo aproximado EW y alto buzamiento al N. El rumbo del Sistema 2 es similar (EW) pero el buzamiento es contrario y alto dirigido al S.
- Los otros sistemas en la caja techo son secundarios, teniendo el Sistema 3 y Sistema 4 rumbo aproximado de NW con alto buzamiento al SW y NE respectivamente. El Sistema 5 también secundario tiene rumbo NS con moderado buzamiento al E.
- Para el mineral, hay un sistema principal Sistema 1 con rumbo NEE con moderado buzamiento al NW, este sistema también está asociado al rumbo de la veta. Otro sistema principal Sistema 2 que tiene rumbo aproximado EW con alto buzamiento dirigido al S. Un tercer sistema principal Sistema 3 tiene rumbo NNW y alto buzamiento al NE. Un cuarto sistema principal Sistema 4 tiene rumbo NE con alto buzamiento al SE
- Para la caja piso se aprecia la presencia de dos sistemas principales, Sistema 1 y Sistema 2, con rumbos similares EW y alto buzamiento al N y al S respectivamente. Los Sistemas 3 y 4, secundarios, tienen rumbo aproximado

NS con altos buzamientos al W y E respectivamente. El Sistema 5, secundario, es de rumbo NW con alto buzamiento al NE.

En resumen, el aspecto estructural de la veta Paola es similar al de la veta Mirtha, esto puede deberse a que la veta Paola nace como un ramal de la veta Mirtha con rumbo girado de aproximadamente 20°, de allí la similitud entre ambas.

➤ **Veta Paola Norte**

- En la caja techo se observa un sistema principal Sistema 1 con rumbo NS y alto buzamiento al E. Un segundo sistema principal Sistema 2 tiene rumbo NNW con alto buzamiento al NE. El tercer sistema principal Sistema 3 también tiene rumbo NS y alto buzamiento al W.
- El cuarto sistema en la caja techo Sistema 4 también puede considerarse como principal, teniendo rumbo aproximado de EW con alto buzamiento dirigido al N. Este sistema se halla asociado al sistema de fallamiento EW que existe en toda el área, además está relacionado también al principal Sistema 1 de las vetas Mirtha y Paola.
- Para la roca mineralizada, existen tres sistemas principales, el Sistema 1 que tiene rumbo NS con buzamiento moderado al E, además este sistema está asociado al rumbo y dirección de la veta, y los Sistemas 2 y 3 que tiene rumbo aproximado de NEE con buzamientos empinados y contrarios orientados al NW y SE respectivamente.
- En la caja piso se presentan los mismos sistemas principales que se han formado en el mineral con una ligera variación. Adicionalmente hay un Sistema 4 de rumbo EW con alto buzamiento al N. También se aprecia un Sistema 5 que es de rumbo NNW y alto buzamiento SW.

- En ambas cajas se muestra un sistema de rumbo EW con alto buzamiento al N, este sistema puede estar asociado al sistema principal de las vetas Mirtha y Paola por la similitud de los mismos, que puede estar asociado también al sistema principal de fallamiento.

Geológicamente se puede apreciar que la veta Paola Norte es la continuación de la veta Paola que por efecto del tectonismo y fallamiento de la zona ha desviado la veta Paola Norte hacia un rumbo NS, de allí que el arreglo estructural tiene similitud de comportamiento entre la veta y sus cajas.

### ***Aspectos Estructurales***

Las características estructurales de las discontinuidades se establecieron mediante tratamiento estadístico de la información registrada tanto en el mapeo geomecánico en interior mina, así como la información de estructuras registradas en los planos geológicos proporcionados, por otro lado, también se tiene información del logeo geotécnico de los testigos de los sondajes diamantinos (ver Anexos 1 y 2), la que se trató de compatibilizar con las observaciones in-situ. Según esto, las siguientes son las principales características estructurales de las discontinuidades tanto mayores como menores:

#### **Discontinuidades mayores (fallas):**

Se ha podido observar las fallas comunes cercanas a las vetas que por lo general tienen espaciamientos alrededor de 5 m con persistencia de decenas de metros. La mayoría de estas fallas tienen rumbo paralelo a las vetas presentando relleno de materiales de arcilla, panizo y óxidos con espesores variables entre 10 a 20 cm. Las aperturas son menores a 5 mm. Las superficies de las caras son lisas en algunos tramos y con espejos de fallas.

Esta descripción corresponde a las fallas comunes, ya que en el caso de las fallas Norte y Carmen, sus características son distintas. Las fallas constituyen conductos para el agua.

**Discontinuidades menores (diaclasas):**

La descripción de estas características es similar para el entorno de la masa rocosa en las tres vetas. Sus características estructurales son: espaciamiento por lo general está entre 6 a 20 cm, teniendo la masa rocosa alejada de las vetas, espaciamientos mayores a 20 cm a excepción de la caja techo de la veta Paola Norte. La persistencia se halla entre 3 y 10 m, apertura variable menor a 1 mm, con paredes ligeramente rugosas, el relleno es suave con presencia de arcilla y óxidos, las paredes de las discontinuidades están ligeramente alteradas, con presencia de humedad.

**4.1.3. Clasificación de la masa rocosa**

La clasificación geomecánica de la masa rocosa se realizó utilizando el criterio de Bieniawski de 1989 (RMR – Rock Mass Rating o Valoración de la Masa Rocosa). Los valores de resistencia compresiva de la roca intacta fueron obtenidos conforme a los procedimientos señalados más adelante en la Sección 4.5.1 – Resistencia de la roca intacta. Los valores de designación de la calidad de la roca (RQD) fueron determinados por un lado mediante el registro lineal de discontinuidades utilizando la relación propuesta por Priest & Hudson (1986) teniendo como parámetro de entrada principal la frecuencia de fracturamiento por metro lineal, por otro lado, fueron determinados directamente durante el logueo geotécnico de los testigos los sondajes diamantinos. El criterio de Bieniawski (1989) modificado para esta evaluación a fin de clasificar a la masa rocosa, se presenta en la siguiente Tabla:

**Tabla 5. Criterio para la Clasificación de la Masa Rocosa**

Tipo de Roca	Rango RMR	Rango Q	Calidad según RMR
II	> 60	> 5.92	Buena
IIIA	51 – 60	2.18 – 5.92	Regular A
IIIB	41 – 50	0.72 – 1.95	Regular B
IVA	31 – 40	0.24 – 0.64	Mala A
IVB	21 – 30	0.08 – 0.21	Mala B
V	< 21	<0.08	Muy Mala

Las fuentes de información para clasificar a la masa rocosa del área de evaluación, han sido principalmente de la información registrada en las labores subterráneas y complementadas con la información del logeo geotécnico de los testigos rocosos, ambos realizados como parte del presente estudio.

Los resultados de la clasificación geomecánica se presentan en los formatos de los Anexos 1 y 2, además también se muestran en las Láminas 10 a 27. Utilizando toda la data geomecánica recolectada, se puede obtener los rangos de valores de calidad de la masa rocosa (expresado en RMR) en cada veta y sus cajas adyacentes. En el Cuadro 4.4 se muestran estos resultados, los mismos que indican que la masa rocosa en general varía generalmente desde calidad Mala B (IV-B) hasta calidad Buena (II) en todos ellos, pero por lo general la masa rocosa está en el rango de Regular B (III-B).

**Tabla 6 Calidad de la Masa Rocosa por Tipo de Roca**

Veta	Sector	Litología	Rango RMR	Calidad de la masa rocosa
Mirtha	Caja techo	Toba and.	22 – 55	IVB, IVA, IIIB y IIIA
	Veta	Brecha de Qz (min)	33 – 55	IVA, IIIB y IIIA
	Caja piso	Lava and.	33 – 63	IVA, IIIB, IIIA y II
Paola	Caja techo	Toba and.	22 – 57	IVB, IVA, IIIB y IIIA
	Veta	Brecha de Qz (min)	33 – 52	IVA, IIIB y IIIA
	Caja piso	Lava and.	27 – 60	IVB, IVA, IIIB y IIIA
Paola Norte	Caja techo	Toba and.	27 – 49	IVB, IVA y IIIB
	Veta	Brecha de Qz (min)	29 – 54	IVB, IVA, IIIB y IIIA
	Caja piso	Toba and.	40 – 54	IVA, IIIB y IIIA

#### **4.1.4. Zonificación geomecánica de la masa rocosa**

Para la aplicación racional de los diferentes métodos de cálculo de la mecánica de rocas, es necesario que la masa rocosa bajo estudio esté dividida en áreas de características estructurales y mecánicas similares, debido a que los criterios de diseño y el análisis de los resultados serán válidos solo dentro de masas rocosas que presenten propiedades físicas y mecánicas similares. Por ello, es práctica común en el diseño de excavaciones subterráneas delimitar el área de estudio en zonas geomecánicas o dominios estructurales.

Para la zonificación geomecánica de la masa rocosa se han considerado los aspectos litológicos, geoestructurales y de calidad de la masa rocosa. Según esto, la zonificación elaborada se presenta en secciones, en las Láminas 28 a 47 donde se ha considerado los promedios ponderados de las calidades de la masa rocosa en cada sector para cada veta.

Para la zonificación geomecánica en las distintas vetas, se ha utilizado mayormente la información del registro de calidad de masa rocosa en las labores mineras de los distintos niveles. Además, se ha tenido disponible información de logueo geotécnico de sondajes realizado como parte del presente estudio y también los disponibles de estudios previos (15).

Cabe mencionar que la zonificación geomecánica realizada en estudios previos (Ref.: 15) fue un estimado grueso de la calidad de la masa rocosa en base al logueo geotécnico de sondajes, así como del mapeo geomecánico de unas pocas labores mineras subterránea, lo que permitió realizar la citada zonificación. Los resultados de esta zonificación han servido como referente para ver la tendencia de la calidad en distintos sectores de la mina. Otro aspecto a tomar en cuenta es la calidad de la información geomecánica obtenida en el campo, en algunos casos, según la experiencia

o criterio del personal que toman los datos geomecánicos durante los trabajos de campo puede tener repercusión directa en los resultados de cualquier modelo realizado, esto se ha podido constatar que según el modelo realizado en la Ref.: 15, en muchos sectores de la mina la calidad presentada al parecer se halla sobrestimada en unos sectores y subestimada en otros.

En ese sentido, se ha creído conveniente mostrar la información de la zonificación geomecánica de la Ref.: 15 de modo paralelo en los distintos planos de las secciones geomecánicas realizadas por DCR con la finalidad de contrastar ambas zonificaciones.

En las distintas secciones geomecánicas realizadas para el presente estudio se observa que en varios niveles de la mina y para las tres vetas, la información geomecánica adquirida por DCR no es suficiente, en consecuencia, en varios niveles de la mina no se ha podido mostrar la zonificación geomecánica, por tanto, la información de la zonificación realizada en la Ref.: 15 ha permitido ayudar a ver la tendencia de la calidad en dichos sectores.

Según lo descrito en los párrafos precedentes se ha realizado la zonificación en distintas secciones tanto para la veta Mirtha, Paola y Paola Norte. En los siguientes acápites se muestran los resultados de dicha zonificación para cada veta en particular.

#### ***Zonificación Geomecánica en la Veta Mirtha***

En este caso se elaboraron las secciones 480, 520, 580, 760, 800, 840, 880 y 720, en las cuales se presenta la zonificación. En la Tabla 7 se presenta el resumen obtenido.

**Tabla 7** Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Mirtha

Veta	Nivel	Sección	Sector	Litología	RMR promedio	Dominio estructural
Mirtha	4790 – 4890	920, 880	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Caja piso	Lava andesítica	35	DE-IVA
		840, 800, 760, 580, 520, 480	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB
	4540 – 4640	880, 840, 800	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Caja piso	Lava andesítica	35	DE-IVA
		760	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB

En este cuadro puede apreciarse los valores promedio de calidad para cada litología según las secciones correspondientes y en los niveles mencionados. Como se puede apreciar, para el caso de las secciones 980 y 880 que se hallan hacia el extremo Este, la calidad de la masa rocosa es de menor calidad, esto puede estar asociado a que en este sector se halla próximo la veta Paola Norte y la influencia del mismo puede haber influido en que la zona se halle perturbada y las condiciones geomecánicas sean menos favorables. También es importante mencionar que la calidad de la roca caja alejada mejora al dominio DE-IIIB.

Cabe mencionar que lo citado para lo comprendido entre los niveles 4540 y 4640, la información es escasa y lo resumido corresponde principalmente a lo observado en el nivel 4540.

#### ***Zonificación Geomecánica en la Veta Paola***

Para este caso se puede observar las secciones 760, 800, 840, 880 y 720, las mismas que se presentaron para la veta Mirtha, ya que ambas vetas son ligeramente paralelas. En la Tabla 8 se presenta el resumen obtenido.

**Tabla 8** Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola

Veta	Nivel	Sección	Sector	Litología	RMR promedio	Dominio estructural
Paola	4640 – 4740	920, 840	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB
		880	Caja techo	Toba andesítica	55	DE-IIIA
			Veta	Brecha de Qz (min)	55	DE-IIIA
			Caja piso	Lava andesítica	55	DE-IIIA
	4540 – 4640	880, 840, 800	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB

Las condiciones geomecánicas en la veta Paola son ligeramente favorables respecto al caso de la veta Mirtha. En general la calidad promedio de la masa rocosa mineralizada y roca encajonante pertenece al dominio DE-IIIB, salvo en una sección, la 880 donde se observa que la calidad puede llegar al dominio DE-IIIA.

Para esta veta, la calidad entre los niveles 4540 y 4640 también no tiene suficiente información, pero la tendencia de la calidad puede inferirse según lo citado en el cuadro previo.

#### ***Zonificación geomecánica en la veta Paola Norte***

En el caso de la veta Paola Norte, los resultados de la zonificación geomecánica muestran una mayor variación respecto al caso de las vetas Mirtha y Paola, razón por lo que se ha generado 12 secciones espaciadas cada 20 m (020, 040, .....220, y 240) con la finalidad de poder apreciar en mayor detalle dicha variación de calidad.

Esta veta tiene un rumbo promedio de NS y el plunge de la estructura va profundizando de Sur a Norte, es decir en las primeras secciones (20 al 80) el mineral se halla encima del Nv. 4640, en las secciones siguientes ubicadas más al Norte (100 al 140) el mineral llega hasta el Nv. 4540, finalmente en las secciones que continúan al Norte (160 al 240) la estructura mineralizada pasa hasta debajo del Nv. 4540 pero asciende solamente hasta el Nv. 4640, solo en la sección 240 se aprecia que el mineral

se encuentra generalmente debajo del Nv. 4540. En tal sentido, la zonificación de la veta Paola Norte estará indicado según las secciones correspondientes que son resumidas en el siguiente cuadro:

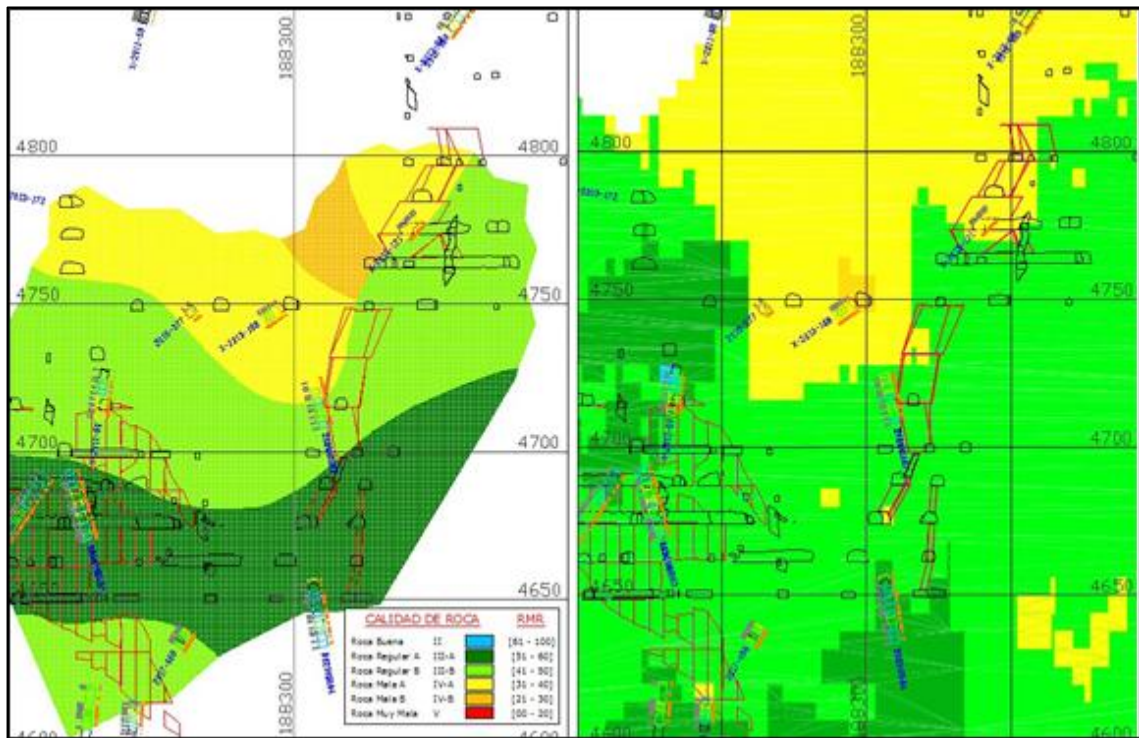
**Tabla 9** Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola Norte

Veta	Sección	Nivel	Sector	Litología	RMR promedio	Dominio estructural
Paola Norte	020	4740 – 4790	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Caja piso	Toba andesítica	35	DE-IVA
	040	4690 – 4790	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
	060, 080, 100	4640 – 4740	Caja piso	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	55	DE-III A
	120, 140, 160	4640 – 4690	Caja piso	Toba andesítica	55	DE-III A
			Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Toba andesítica	35	DE-IVA
	120, 140, 160, 180, 200, 220, 240	4540 – 4590	Caja piso	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Toba andesítica	45	DE-IIIB

En la Ilustración se muestra como ejemplo los resultados encontrados en la Sección 040, donde el lado izquierdo indica la zonificación realizada con los datos registrados del mapeo geomecánico y el de la derecha es lo encontrado con la Ref.: 15.

A partir de este cuadro podemos señalar los siguientes comentarios:

### Ilustración 6 Ejemplo de Zonificación Geomecánica – Sección 040



Fuente: Departamento de Geomecánica.

- La zona superior ubicada encima del nivel 4740 tiene por lo general calidad del dominio DE-IVA y DE-IIIB, y localmente DE-IVB, tal es así que en la sección 020, el mineral y las cajas tienen calidad DE-IVA, en el caso de la sección 040 el mineral y la caja techo presentan DE-IVA y DE-IVB, y aproximadamente la mitad del mineral y la caja piso tiene calidad del dominio DE-IIIB. En este caso la zonificación realizada en la Ref.: 15 se asemeja a lo encontrado por DCR.
- Para el mineral que se halla en estas mismas secciones entre los Niveles 4640 y 4740 se observa que la calidad es homogénea y pertenece a los dominios DE-IIIB y DE-IIIA, salvo que en la sección 040 aparece en la caja techo calidad DE-IVA debajo del nivel 4740.
- En las secciones 060, 080 y 100 el mineral se halla entre los niveles 4640 y 4740 y la calidad es del dominio DE-IIIA y en la sección 120 del dominio DE-IIIB. En el

caso de la zonificación de la Ref.: 15 la calidad es generalmente DE-IIIB. Para el caso de la caja techo, ésta es generalmente DE-IVA y la caja piso al dominio DE-III A. Cercano al nivel

- 4640 localmente hay rocas del dominio DE-IVA tanto en la caja techo, en el mineral y en la caja piso.
- En la sección 140, tanto el mineral y las cajas se hallan en el dominio DE-IVA entre los niveles 4640 y 4690, esta zonificación coincide con la determinada en la Ref.: 15.
- Un aspecto resaltante a mencionar es que en las secciones 080, 100, 120 y 140, entre los niveles 4640 y 4740, la veta Paola Norte invierte su buzamiento por lo que las cajas también cambiarían de denominación.
- A partir de la sección 160 el mineral a minar se ubica entre los niveles 4540 y 4640. Los resultados de la zonificación de DCR muestra solamente en la zona cercana al nivel 4540 donde la calidad del mineral y las cajas es del dominio DE-IIIB. Esta zonificación coincide en parte con la obtenida en la Ref.: 15 con la diferencia de que en las secciones 160 y 180 la calidad del mineral y la caja techo debajo del nivel 4540 pertenece al dominio DE-IVA.

#### **4.1.5. Resistencia de la roca**

##### ***Resistencia de la Roca Intacta***

Uno de los parámetros más importantes del comportamiento mecánico de la masa rocosa, es la resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta (c) o denominada también UCS. Durante los trabajos de campo como parte del mapeo geomecánico de la masa rocosa y el logueo geotécnico de los testigos de los sondajes diamantinos, se llevaron a cabo ensayos de golpes con el martillo de geólogo siguiendo las normas

sugeridas por la ISRM y también ensayos de rebote con el martillo de Schmidt, a fin de estimar la resistencia compresiva de la roca intacta.

Los valores de rebote con el martillo de Schmidt realizados en campo para estimar el rango de resistencias de la roca intacta, son presentados en el cuadro para las estructuras mineralizadas en estudio. Aquí se puede ver que los valores registrados generalmente son de baja a moderada resistencia lo que servirá más adelante para realizar algunos afinamientos en la adopción de los valores más representativos.

**Tabla 10** *Resultados de los rangos de UCS según el martillo de Schmidt*

<b>Veta</b>	<b>Litología</b>	<b>Rango</b>
Mirtha	Lava andesítica	R3 – R4
	Mineral	R3 – R4
	Toba andesítica	R3
	Toba Bx andesítica	R2 – R3
Paola	Mineral	R2 – R4
	Toba andesítica	R2 – R4
	Toba Bx andesítica	R2 – R3
Paola Norte	Mineral	R2 – R4
	Toba andesítica	R2 – R3
	Toba Bx andesítica	R2 – R3

Por otro lado, en la evaluación geomecánica previa realizada el año 2015 (Ref.: 15), se llevó a cabo una cantidad muy significativa de ensayos de mecánica de rocas de los cuales se han aprovechado dichos resultados para la presente evaluación. En aquella oportunidad se realizaron ensayos de carga puntual, compresión uniaxial y compresión triaxial, cuyos resultados resumidos se muestran. En el cuadro se muestra el resumen de los resultados obtenidos de carga puntual  $I_s$  normalizados a diámetro 50 mm.

**Tabla 11 Resultados de ensayos de carga puntual (A) – Ref.: 15**

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	I <sub>s</sub> (MPa)	c (MPa)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	2.9	69.6
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	5.93	142.32
4590	1	Paola	CP	T-And	2.18	52.32
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	2.09	50.16
4590	3	Paola Techo	VT	Min	1.1	26.4
4640	1	Mirtha	CT	T-And	5.64	135.36
4640	2	Paola	VT	Min	4.57	109.68
4640	3	Paola Norte	VT	Min	4.82	115.68
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	2.56	61.44
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	0.60	14.4
4690	1	Mirtha	CP	T-And	5.78	138.72
4690	2	Paola	VT	Min	5.26	126.24
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	5.99	143.76
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	1.15	27.6
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	6.29	150.96
4740	2	Paola	CT	T-And	1.47	35.28
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	1.78	42.72
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	3.72	89.28
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	6.31	151.44
4790	2	Paola	VT	Min	6.28	150.72
4840	1	Mirtha	CP	T-And	6.36	152.64
4840	2	Paola	CP	T-And	4.79	114.96
4890	1	Mirtha	CT	T-And	0.82	19.68
4890	2	Paola	VT	Min	5.75	138

También se realizaron ensayos de carga puntual en la mina en las distintas vetas, así como en diferentes litologías y niveles de la misma. El resumen de estos resultados está resumido en la Tabla12, donde la resistencia compresiva ha sido estimada por el consultor con los datos disponibles de I<sub>s</sub>. En la tabla se presentan los resultados de los ensayos de compresión uniaxial, en la otra tabla se muestra los resultados de los ensayos de compresión triaxial, con los cuales se han obtenido también, además de la resistencia compresiva no confinada de la roca intacta, valores de la constante “mi” del criterio de falla de Hoek & Brown (2002-2006) y los parámetros de resistencia al corte de Mohr Coulomb: cohesión y ángulo de fricción, todos estos parámetros correspondientes a la roca intacta.

**Tabla 12** Resultados de los ensayos de carga puntual (B) – Ref.: 15

Veta	Litología	I <sub>s</sub> (MPa)			c (MPa)		
		Rango	Promedio	Desv. est.	Rango	Promedio	Desv. est.
Mirtha	Lava andesítica	0.78 – 8.64	3.84	2.68	18.9 – 230.1	102.9	71.4
	Mineral	0.24 – 9.11	4.00	2.13	6.7 – 238.0	108.0	56.5
	Toba andesítica	0.04 – 8.53	3.47	2.10	1.0 – 239.9	73.5	58.5
	Toba Bx andesítica	0.05 – 9.17	1.85	1.78	1.3 – 219.3	50.2	47.7
Paola	Mineral	0.03 – 8.38	3.19	2.61	0.8 – 212.4	84.1	68.1
	Toba andesítica	0.17 – 3.16	1.41	0.92	4.2 – 81.2	37.2	23.8
	Toba Bx andesítica	0.02 – 3.16	1.68	1.51	0.5 – 81.2	43.3	38.9
Paola Norte	Mineral	0.52 – 3.78	2.09	1.08	14.2 – 100.9	56.0	29.7
	Toba andesítica	0.31 – 2.88	1.12	0.89	9.7 – 78.5	31.2	24.4
	Toba Bx andesítica	0.06 – 4.36	1.75	1.44	1.6 – 109.7	45.5	35.2

**Tabla 13** Resultados de ensayos de compresión uniaxial – Ref.: 15

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	47.75
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	93.83
4590	1	Paola	CP	T-And	61.89
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	49.47
4590	3	Paola Techo	VT	Min	41.93
4640	1	Mirtha	CT	T-And	71
4640	2	Paola	VT	Min	53.30
4640	3	Paola Norte	VT	Min	93.31
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	84.29
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	19.91
4690	1	Mirtha	CP	T-And	82.05
4690	2	Paola	VT	Min	47.75
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	109.96
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	39.73
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	123.11
4740	2	Paola	CT	T-And	39.89
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	42.12
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	72.21
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	67.4
4790	2	Paola	VT	Min	62.88
4840	1	Mirtha	CP	T-And	54.15
4840	2	Paola	CP	T-And	99.72
4890	1	Mirtha	CT	T-And	34.82
4890	2	Paola	VT	Min	108.5

**Tabla 14** Resultados de ensayos de compresión triaxial – Ref.: 15

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	$\sigma_c$ (MPa)	mi	Cohesión (MPa)	Angulo de fricción (°)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	52.3	8.29	10.1	47.04
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	219.9	50	18.756	69.9
4590	1	Paola	CP	T-And	57.9	11.17	9.878	51.31
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	41.5	50	4.43	64.56
4590	3	Paola Techo	VT	Min	41.8	7.91	8.258	45.77
4640	1	Mirtha	CT	T-And	74.1	37.284	7.719	64.69
4640	2	Paola	VT	Min	55.4	10.67	9.638	50.59
4640	3	Paola Norte	VT	Min	87.4	28.577	9.927	62.92
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	65.9	24.427	8.132	60.52
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	16.4	3.674	4.378	32.15
4690	1	Mirtha	CP	T-And	82.1	1	8.827	64.08
4690	2	Paola	VT	Min	46.4	16.254	6.869	55.03
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	115.5	50	10.284	68.36
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	23.4	27.367	3.276	56.87
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	117.8	19.948	15.414	60.07
4740	2	Paola	CT	T-And	41.8	5.702	9.414	41.13
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	41.8	8.018	8.225	45.95
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	67.6	38.945	7.042	64.61
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	74.5	50	7.020	66.95
4790	2	Paola	VT	Min	67.6	31.736	7.539	63.01
4840	1	Mirtha	CP	T-And	68.6	22.288	8.755	59.75
4840	2	Paola	CP	T-And	96.8	17.991	13.317	58.45
4890	1	Mirtha	CT	T-And	38.4	50	5.71	54.58
4890	2	Paola	VT	Min	159.8	50	13.862	69.21

Adicionalmente, para la roca intacta también se han realizado ensayos de tracción indirecta por el Método Brasileiro y ensayos de propiedades físicas, presentándose los resultados. En el cuadro se presenta el resumen de resultados de tracción indirecta y en el cuadro el resumen para el caso de propiedades físicas.

**Tabla 15** Resultados de ensayos de tracción indirecta – Ref.: 15

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	Resistencia a la tracción (MPa)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	5.05
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	6.09
4590	1	Paola	CP	T-And	3.83
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	6.51
4590	3	Paola Techo	VT	Min	3.72
4640	1	Mirtha	CT	T-And	5.07
4640	2	Paola	VT	Min	3.92
4640	3	Paola Norte	VT	Min	3.82
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	3.43
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	1.21
4690	1	Mirtha	CP	T-And	3.22
4690	2	Paola	VT	Min	4.52
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	5.61
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	2.59
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	5.13
4740	2	Paola	CT	T-And	4.27
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	4.63
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	6.44
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	6.22
4790	2	Paola	VT	Min	5.89
4840	1	Mirtha	CP	T-And	6.19
4840	2	Paola	CP	T-And	4.49
4890	1	Mirtha	CT	T-And	2.11
4890	2	Paola	VT	Min	5.66

**Tabla 16** Resultados de las propiedades físicas de la roca intacta – Ref.: 15

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	Porosidad Aparente (%)	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico Aparente (kN/m <sup>3</sup> )
4540	1	Paola	CP	TBx-And	0.27	2.58	25.28
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	0.02	2.73	26.73
4590	1	Paola	CP	T-And	0.18	2.39	23.45
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	0.08	2.63	25.73
4590	3	Paola Techo	VT	Min	0.11	3.30	32.37
4640	1	Mirtha	CT	T-And	0.55	2.44	23.92
4640	2	Paola	VT	Min	0.55	2.44	23.92
4640	3	Paola Norte	VT	Min	0.05	3.07	30.14
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	0.13	2.55	24.99
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	0.17	2.26	22.14
4690	1	Mirtha	CP	T-And	0.36	2.63	25.8
4690	2	Paola	VT	Min	0.15	2.58	25.31
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	0.41	2.48	24.32
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	1.21	2.33	22.89
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	0.09	2.42	23.72
4740	2	Paola	CT	T-And	0.42	2.47	24.17
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	0.32	2.28	22.35
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	0.22	2.54	24.94
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	0.05	2.31	22.66
4790	2	Paola	VT	Min	0.30	2.36	23.11
4840	1	Mirtha	CP	T-And	0.09	2.14	21.01
4840	2	Paola	CP	T-And	0.26	2.7	26.45
4890	1	Mirtha	CT	T-And	0.48	2.32	22.79
4890	2	Paola	VT	Min	0.19	2.14	20.95

Los valores a utilizarse para los análisis de diseño, que son presentados en el capítulo siguiente han sido motivo de análisis de interpretación a partir de la data extraída del informe de la Ref.: 15 y de las observaciones de campo realizadas como parte del presente estudio.

### ***Resistencia de las Discontinuidades***

Desde el punto de vista de la estabilidad controlada por las discontinuidades estructurales, es importante conocer las características de resistencia al corte de las discontinuidades, ya que éstas constituyen superficies de debilidad de la masa rocosa y por tanto planos potenciales de falla. La resistencia al corte en este caso, está regida por los parámetros de fricción y cohesión de los criterios de falla Mohr-Coulomb. Estos

parámetros fueron determinados mediante ensayos de corte directo en laboratorio de mecánica de rocas.

**Tabla 17** *Valores de la cohesión y ángulo de fricción de las discontinuidades – Ref.:*

15

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	0.076	29.64
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	0.104	33.94
4590	1	Paola	CP	T-And	0.112	27.12
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	0.122	31.47
4590	3	Paola Techo	VT	Min	0.040	36.57
4640	1	Mirtha	CT	T-And	0.098	31.53
4640	2	Paola	VT	Min	0.090	29.17
4640	3	Paola Norte	VT	Min	0.130	33.35
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	0.132	28.99
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	0.026	27.37
4690	1	Mirtha	CP	T-And	0.080	30.96
4690	2	Paola	VT	Min	0.080	31.64
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	0.058	30.45
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	0.056	29.23
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	0.110	35.61
4740	2	Paola	CT	T-And	0.138	32.86
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	0.095	28.81
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	0.114	30.91
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	0.084	30.91
4790	2	Paola	VT	Min	0.081	31.36
4840	1	Mirtha	CP	T-And	0.106	31.42
4840	2	Paola	CP	T-And	0.076	33.40
4890	1	Mirtha	CT	T-And	0.084	29.11
4890	2	Paola	VT	Min	0.104	33.94

### ***Resistencia de la Masa Rocosa***

Para estimar los parámetros de resistencia de la masa rocosa, se utilizó el criterio de falla de Hoek & Brown (2002-2006), con el programa ROCLAB de Rocscience Inc. (2013). Para ello se ha tenido sumo cuidado en seleccionar los valores más representativos de los resultados de laboratorio correlacionando con las observaciones realizadas durante los trabajos de campo, resultando de ello los valores de calidad de la masa rocosa involucrada con cada dominio estructural, resistencia compresiva uniaxial

de la roca intacta, y constante “mi” de la roca intacta, todos ellos desarrollados en la presente evaluación para cada veta. En el siguiente cuadro se presentan los parámetros de resistencia de la masa rocosa.

**Tabla 18** *Parámetros de Resistencia de la Masa Rocosa*

Litología	GSI*	$\sigma_{ci}$ (MPa)	(kN/m <sup>3</sup> )	“mi”	m <sub>b</sub>	S <sub>mr</sub>	E <sub>mr</sub> MPa	$\nu$
<b>Veta Mirtha</b>								
Toba andesítica	35	30	24.5	15	1.137	0.000436	897	0.28
Toba andesítica	45	50	24.5	15	1.691	0.001434	2917	0.26
Brecha de Qz-min	35	50	26.0	25	1.896	0.000436	1602	0.28
Brecha de Qz-min	45	80	26.0	25	2.819	0.001434	5000	0.25
Lava andesítica	35	40	25.0	22	1.668	0.000436	1367	0.28
Lava andesítica	45	70	25.0	22	2.481	0.001434	4667	0.26
<b>Veta Paola</b>								
Toba andesítica	45	55	24.5	15	1.691	0.001434	3208	0.26
Toba andesítica	55	80	24.5	15	2.515	0.004714	8770	0.24
Brecha de Qz-min	35	35	26.0	25	1.896	0.000436	1122	0.28
Brecha de Qz-min	45	60	26.0	25	2.819	0.001434	3750	0.26
Lava andesítica	45	60	25.0	22	2.481	0.001434	4000	0.26
Lava andesítica	55	90	25.0	22	3.689	0.004714	11276	0.24
<b>Veta Paola Norte</b>								
Toba andesítica	35	25	24.5	15	1.137	0.000436	748	0.28
Toba andesítica	45	50	24.5	15	1.691	0.001434	2917	0.26
Toba andesítica	55	70	24.5	15	2.515	0.004714	7674	0.24
Brecha de Qz-min	35	35	28.0	25	1.896	0.000436	1122	0.28
Brecha de Qz-min	45	60	28.0	25	2.819	0.001434	3750	0.26
Brecha de Qz-min	55	80	28.0	25	4.192	0.004714	9396	0.24

Donde:

GSI : Calidad de la masa rocosa GSI = RMR (para condiciones húmedas)

$\sigma_{ci}$  : Resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta

$\rho$  : Densidad de la roca intacta

Mi : Constante de la roca intacta

Mb : Constante de la masa rocosa

smr : Constante de la masa rocosa

Emr : Módulo de deformación de la masa rocosa

v : Relación de Poisson de la masa rocosa

Cabe señalar que en las vetas Mirtha y Paola la toba andesítica está relacionada con la caja techo la brecha de cuarzo con el mineral y la lava andesítica con la caja piso. En el caso de Paola Norte la toba andesítica está relacionada a la caja techo y piso y la brecha de cuarzo al mineral.

#### **4.1.6. Condiciones del agua subterránea**

La presencia del agua dentro de la masa rocosa, influye adversamente en las condiciones de estabilidad de las labores subterráneas. Su principal efecto es la presión que ejerce en las discontinuidades, disminuyendo la resistencia al corte y por tanto disminuyendo el factor de seguridad o grado de estabilidad, por ello es importante tomarlo en cuenta.

Según se pudo observar durante los mapeos geomecánicos de las labores subterráneas que la masa rocosa se muestra húmeda a seca a pesar de que la evaluación se hizo en época de lluvias, en un mínimo porcentaje (5 %) de las estaciones de mapeo se han registrado condiciones mojadas con ligera filtración de agua.

Cuando la masa rocosa es de mala calidad la presencia del agua puede influir significativamente de manera negativa en las condiciones de estabilidad de las labores mineras que crucen por estos sectores, en ese sentido es recomendable controlar la presencia del agua llevando un adecuado manejo y drenaje de ella a medida que la operación se desarrolle.

En algunos sectores se ha podido apreciar las filtraciones de agua que son debidas a:

- La presencia de cámaras de bombeo en las labores de los subniveles superiores.
- Filtraciones por fallas paralelas a las estructuras de las vetas.

- Presencia de agua estancada en labores de subniveles superiores.
- Filtraciones de agua en labores cercanas a superficie en el nivel 4840 por algunos tramos de la Falla Mirtha y de la Falla 1, muy cercanos a las estructuras de la veta Paola.

En el último caso, la presencia del agua influye considerablemente en la estabilidad del macizo rocoso debido a que la filtración se halla en zona donde el macizo es de calidad IVA con tendencia a IVB con rellenos de panizos y brechas.

Según el estudio hidrogeológico realizado por GWR Ingenieros Asociados S. A. C. en el año 2015, las filtraciones y el drenaje subterráneo en la Unidad Minera Tambomayo se evidencian a través de las labores mineras y galerías de drenaje en los Niveles 4890, 4840, 4790 y 4740. Ese mismo estudio deja constancia que existe presencia mínima de agua subterránea en los diferentes niveles, que se manifiestan mediante goteos a través del medio fracturado y diaclasas del macizo rocoso.

#### **4.1.7. Esfuerzos in-situ**

Es importante conocer la magnitud de los esfuerzos in-situ ya que estos influirán directamente en las condiciones de estabilidad de las excavaciones. En vista de que no se dispone de mediciones de esfuerzos in-situ para la Mina Tambomayo se han estimado los mismos tomando en cuenta 2 criterios:

- El primero, utilizando el concepto de carga litostática (Hoek & Brown, 1978) conjuntamente con el criterio de Sheorey (1994).
- El segundo, utilizando la información del Mapa Mundial de Esfuerzos (WSM).

Para la aplicación del concepto de carga litostática se ha considerado la profundidad media de las diferentes zonas de estudio y la constante “k” del criterio de Sheorey como se observa en la tabla. La veta Paola Norte varía en profundidad de 300 a 400 m.

**Tabla 19** Magnitud de los Esfuerzos in-situ.

<b>Zona</b>	<b>Profundidad media (m)</b>	<b>Constante "k"</b>	<b>Esfuerzo vertical (MPa)</b>	<b>Esfuerzo horizontal (MPa)</b>
Paola Norte	350	0.52	9.1	4.7
Paola	320	0.54	8.3	4.5
Mirtha	150	0.80	3.9	3.1
Mirtha	420	0.50	10.4	5.2

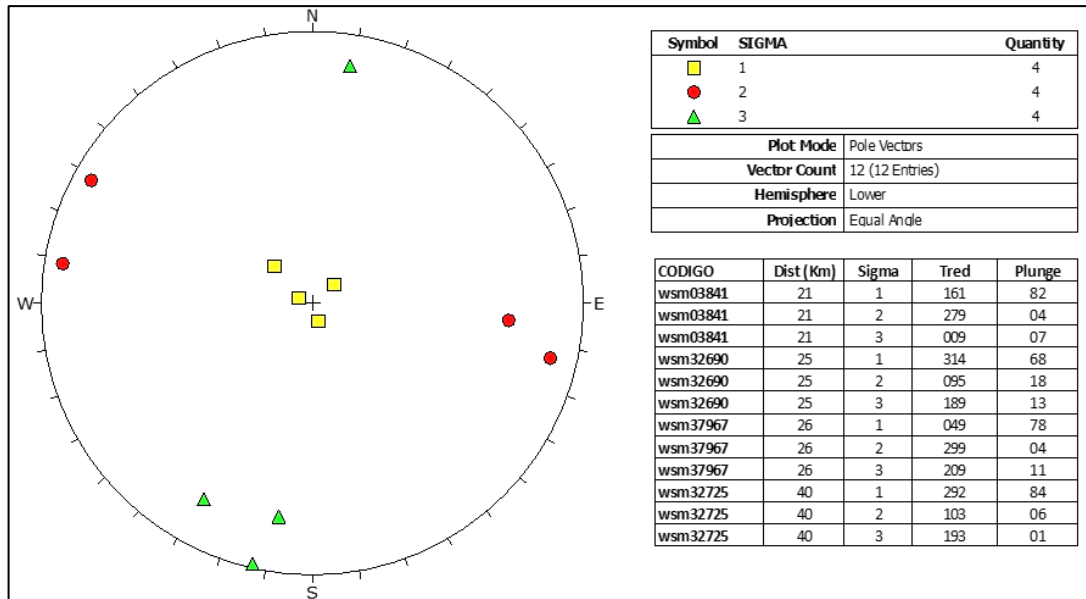
De modo particular del sitio de minado en cada veta, existen varias profundidades de minado según el nivel donde se lleve a cabo la explotación. En ese sentido para los modelos particulares de simulación se han establecido los esfuerzos in-situ en los distintos modelos para los cálculos correspondientes.

En relación al WSM (Ref.: 8), se ha considerado un área de búsqueda de 40 km a la redonda, en esta área de búsqueda se ha tomado en cuenta los 4 datos disponibles (wsm03841, wsm32690, wsm37967 y wsm32725).

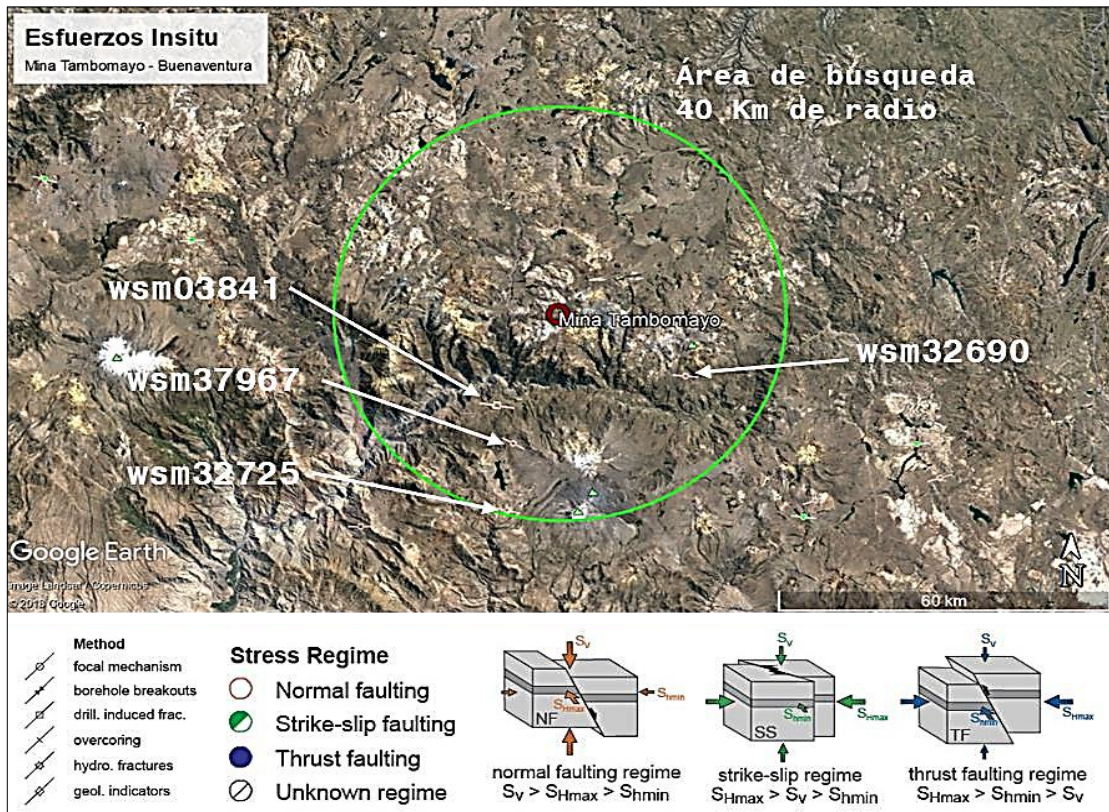
En la ilustración se muestra el estereograma con la orientación de los esfuerzos principales de los 4 datos encontrados en WSM para la estimación de los esfuerzos in-situ.

A partir de la información obtenida del WSM se puede mencionar lo siguiente:

**Ilustración 7** Ubicación de los datos obtenidos del WSM.



**Ilustración 8** Orientación de los Esfuerzos Principales de los datos obtenidos del WSM.



- En todos los casos el esfuerzo principal mayor es aproximadamente vertical.
- En todos los casos los esfuerzos principales menor e intermedio son aproximadamente horizontales.
- El esfuerzo principal menor tiene orientación aproximada NS y el esfuerzo principal intermedio tiene una orientación EW.
- En base a estos 3 puntos se concluye que el esfuerzo vertical es mayor que el esfuerzo horizontal, es decir  $k < 1$ .

Considerando lo señalado en los párrafos anteriores y hasta que no se cuenten con mediciones de esfuerzos in-situ, es conveniente asumir para el caso de Mina Tambomayo valores de la constante  $k$  igual a 1 o menores que 1.

## **4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados**

### **4.2.1. Consideraciones sobre las condiciones de estabilidad**

#### *Direcciones preferenciales de avance de las excavaciones*

Existen direcciones preferenciales en las cuales se puede alinear el avance de las excavaciones, de tal manera de lograr mejores condiciones de estabilidad de las mismas. Las condiciones más favorables para la estabilidad ocurren cuando se avanzan las excavaciones en forma perpendicular al sistema principal de discontinuidades estructurales, de manera contraria, las condiciones más desfavorables para la estabilidad ocurren, cuando se avanzan las excavaciones en forma paralela al sistema principal de discontinuidades.

Para el caso de la veta Mirtha, en el mineral y en la caja techo la dirección preferencial ocurre cuando se avanza en dirección SW-NE o en la dirección NW-SE, debido a que los sistemas principales tienen rumbo NS y EW. En la caja piso solo queda el alineamiento SW-NE.

En la veta Paola, la dirección preferencial tanto en la roca mineralizada y roca encajonante ocurre en el alineamiento de NS al SW-NE.

Para el caso de la veta Paola Norte, según el arreglo estructural que presenta la masa rocosa del mineral y en la caja techo, la dirección preferencial ocurre cuando las excavaciones son orientadas en la dirección SW-NE a EW, y en el caso de la caja piso resulta que la dirección debería estar dirigida de EW hacia el NW-SE.

Con la dirección preferencial citada se lograría mejores condiciones de estabilidad de las excavaciones que se realizarán como parte del minado del yacimiento por lo que es recomendable adoptar estas direcciones en la medida que sea posible, lo cual favorecerá a la mejora de las condiciones de estabilidad, utilización de menor sostenimiento y mayor velocidad al minado. Para el caso de los tajeos en las vetas, por razones de orden técnico estos por lo general estarán alineados con el rumbo de las mismas y en las zonas potentes la opción es adoptar tajeos alineados perpendicular a la veta. En cualquier caso, hay que tener en cuenta estos hechos para la adopción de los sistemas de sostenimiento requeridos.

#### **4.2.2. Aberturas máximas de las excavaciones y sostenimiento**

Para llevar a cabo esta evaluación, las excavaciones han sido divididas en tres categorías:

- Excavaciones permanentes
- Excavaciones temporales
- Tajeos.

##### ***Excavaciones permanentes***

Se incluyen aquí: rampas, galerías de nivel, cámaras de chancado, talleres de mantenimiento, estaciones de bombeo, comedores, polvorines, etc.

En lo posible estas excavaciones deben ser orientadas según las direcciones preferenciales de avance mencionadas. En tal caso, se mejorarán las condiciones de estabilidad, la velocidad de avance de la excavación y se disminuirán los requerimientos de sostenimiento.

En este tipo de excavaciones deberá instalarse un sostenimiento también permanente, que sea resistente a la corrosión y que sea capaz de soportar cargas adicionales debidas a los cambios de las condiciones de esfuerzos a lo largo de la vida de la mina.

Según los resultados de la clasificación y de la zonificación geomecánica de las distintas vetas y su entorno, las excavaciones permanentes se ubicarán en la caja piso para todos los casos ya que en este sector la roca se presenta con las mejores condiciones geomecánicas donde predomina la presencia de masas rocosas de los dominios DE-III A y DE-III B.

Si consideramos el criterio anterior para clasificar a la masa rocosa del yacimiento, podemos establecer las siguientes aberturas máximas promedio sin sostenimiento sistemático de excavaciones para los diferentes rangos de valores RMR ajustadas por orientación de las discontinuidades, tomando además la profundidad donde se halla ubicado el minado.

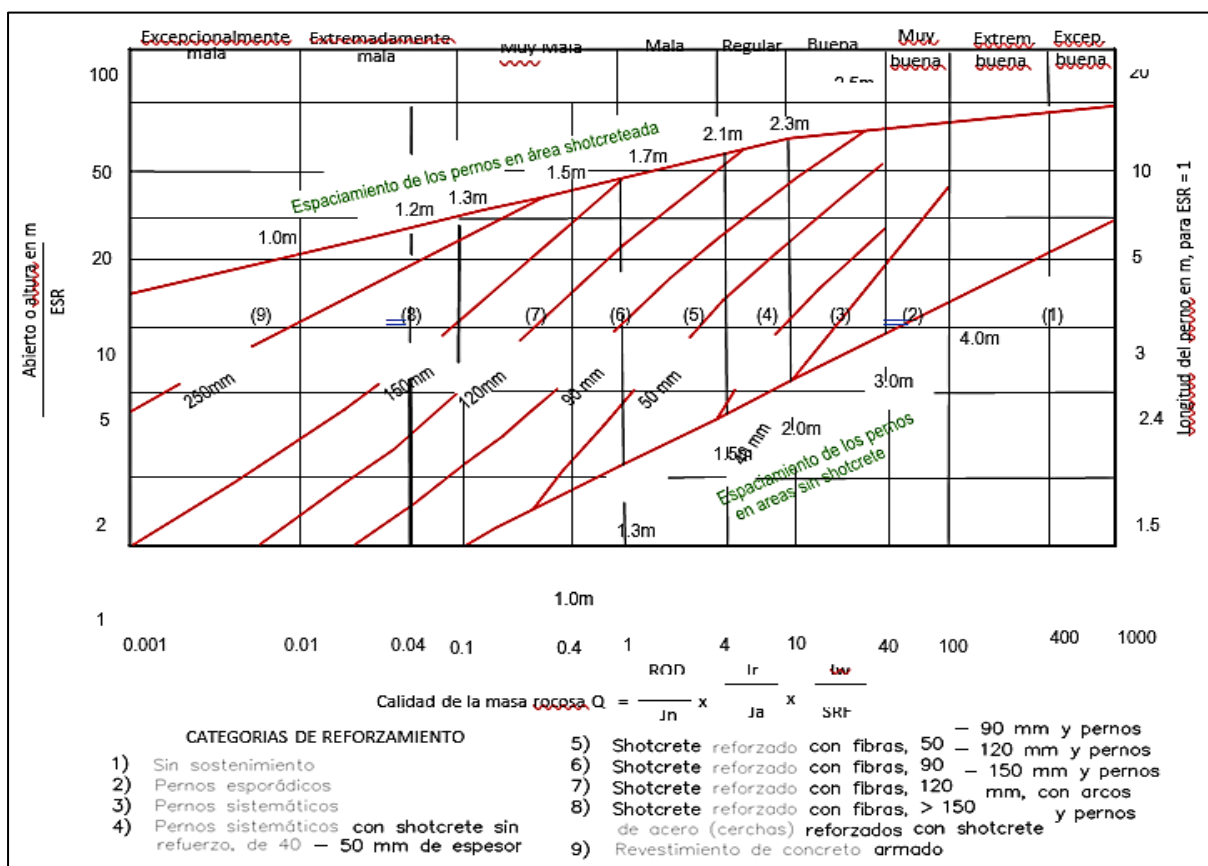
**Tabla 20.** *Aberturas máximas de las Excavaciones Permanentes*

Dominio	Rango RMR	Promedio RMR	Abertura promedio (m)	Tiempo de autosostenimiento
DE-II	> 60	65	9.0	4 meses
DE-III A	51 – 60	55	5.7	1 mes
DE-III B	41 – 50	45	3.5	4 días
DE-IV A	31 – 40	35	2.4	20 horas

Si consideramos los valores de calidad de la masa rocosa reportados en el capítulo anterior, utilizando los criterios de Bieniawski (1989), se estima que la abertura

máxima sin sostenimiento sistemático para masas rocosas de calidad Regular A (IIIA) es de 5.7 m aproximadamente. Tomando el caso de las masas rocosas de calidad Buena (IIIA), las aberturas de aproximadamente 5.7 m o menores necesitarán solo sostenimiento esporádico según lo requiera la roca localmente. Esto puede ser verificado en la Ilustración 11, para  $Q = 3.39$  ( $RMR \approx 55$ ) y  $ESR = 1.6$ . El sostenimiento esporádico sería efectuado con pernos de roca tipo varilla corrugada o barra helicoidal, cementado o con resina, de 7 a 8 pies de longitud. Para la aplicación del sostenimiento también se debe tomar en cuenta la formación de cuñas en el techo y paredes de acuerdo a los resultados.

**Ilustración 9** Guía para el sostenimiento de excavaciones permanentes (Grimstad y Barton, 1993)



Cabe señalar que, en la minería subterránea del país, las labores mineras permanentes más comunes son aquellas que tienen alrededor de 5 m de abertura

máxima (rampas y galerías de nivel y otros), que también es el caso de mina Tambomayo. Para estas labores, el sostenimiento recomendado se presenta en la tabla.

**Tabla 21** *Sostenimiento para labores de avance permanentes*

Dominio	Rango RMR	Sostenimiento
DE-II	> 60	Requiere solo sostenimiento esporádico
DE-IIIA	51 – 60	Requiere solo sostenimiento esporádico
DE-IIIB	41 – 50	Pernos sistemáticos de 7 pies longitud, espaciados de 1.3 a 1.5 m. De ser requerido instalar malla metálica. Como alternativa usar una capa de shotcrete de 2”.
DE-IVA	31 – 40	Pernos sistemáticos de 7 pies de longitud, espaciados cada 1.0 m + malla metálica de ser requerido + shotcrete de 2” a 3” de espesor.
DE-IVB	21 – 30	Colocar previamente una capa de shotcrete reforzado de 2” de espesor. Pernos sistemáticos de 7 pies de longitud, espaciados cada 1.0 m + malla metálica + shotcrete de 2” a 3” de espesor. Alternativamente, cimbras tipo 6W20 espaciadas de 1.3 a 1.5 m.

Para el caso de las excavaciones permanentes, los pernos de roca recomendados son los de tipo varilla corrugada o barra helicoidal, completamente inyectados con cemento o con resina (cuando haya presencia de agua). Para excavaciones de mayor o menor tamaño a lo mencionado, habrá necesidad de realizar nuevas estimaciones del sostenimiento, para ello entre otros es recomendable utilizar la guía de sostenimiento de la ilustración.

Por otro lado, hay que tener en cuenta la presencia de zonas de falla o intersecciones de fallas, en estos casos se deberá realizar una evaluación geomecánica particular para la estimación de la calidad de la masa rocosa y finalmente definir adecuadamente el sostenimiento utilizando y según el tamaño de la excavación, siendo recomendable instalar sostenimiento sistemático en bóveda y hastiales, utilizando pernos de roca tipo varilla corrugada o barra helicoidal y shotcrete de ser necesario. La longitud y espaciamiento de los pernos, así como el espesor del shotcrete serán determinados mediante la evaluación geomecánica mencionada.

El análisis hasta aquí presentado es válido solo si están ausentes las formaciones de cuñas en los techos y paredes de las excavaciones. Por tanto, este análisis debe ser complementado con la evaluación de la estabilidad estructuralmente controlada que se presenta más adelante.

### ***Excavaciones temporales***

Se incluye aquí las labores de avance asociadas al minado en los tajeos, como cruceros y galerías de perforación en los subniveles, que son excavaciones temporales del tipo de ingreso de personal dentro de las mismas, de tamaño suficientemente pequeño para permitir realizar un buen desatado periódico o reforzarla adicionalmente. También para este caso se pueden considerar excavaciones de 5 m de ancho.

En la tabla se presentan los estimados para el sostenimiento de labores de avance temporales. Teniendo presente las calidades promedio de masa rocosa se ha determinado el sostenimiento necesario para este tipo de excavaciones.

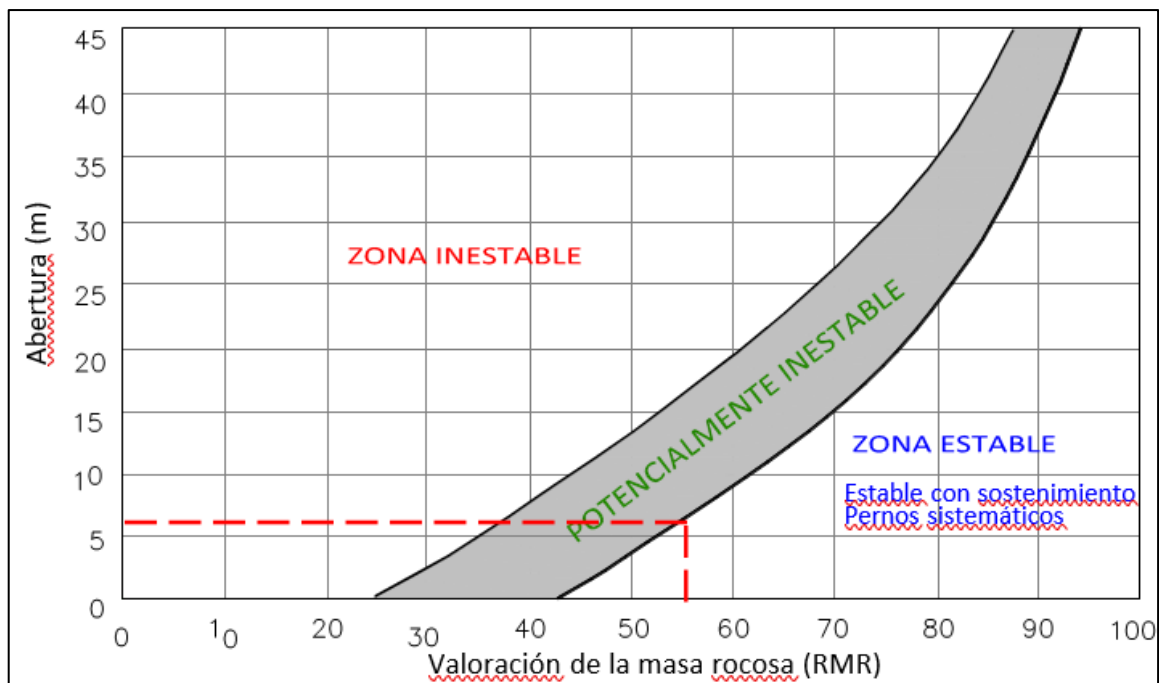
**Tabla 22** *Sostenimiento para labores de avance temporales*

Dominio	Rango RMR	Sostenimiento
DE-II	> 60	Requiere solo sostenimiento esporádico.
DE-III A	51 – 60	Requiere solo sostenimiento esporádico.
DE-III B	41 – 50	Pernos sistemáticos de 7 pies longitud, espaciados cada 1.5 m. Malla metálica de ser requerida. Como alternativa una capa de shotcrete de 2" de espesor.
DE-IV A	31 – 40	Pernos sistemáticos de 7 pies longitud, espaciados de 1.2 a 1.5 m + malla metálica de ser requerida + una capa de shotcrete de 2" de espesor.
DE-IV B	21 – 30	Primero, colocar una capa de shotcrete de 2". Luego pernos sistemáticos de 7 pies longitud, espaciados cada 1.0 m + malla metálica + shotcrete de 2" de espesor.

Para las labores temporales, los pernos de roca recomendados son los de tipo split sets, y en terrenos malos como DE-IV A y DE-IV B es recomendable el uso de los pernos tipo hydrabolts. En estos terrenos también es recomendable utilizar shotcrete reforzado con fibras de acero. Para excavaciones de mayor o menor tamaño que el mencionado se deberá realizar nuevos estimados del sostenimiento.

Para ciertos casos, puede que sea necesario ejecutar excavaciones temporales de mayores dimensiones del tipo de ingreso del personal, principalmente asociados a los tajeos. En este caso podemos estimar la abertura máxima utilizando el criterio de Lang et.al. (1991), según el gráfico, elaborado a partir de 172 casos históricos tomados de excavaciones subterráneas temporales cubriendo una amplia gama de condiciones de roca.

**Ilustración 10** Gráfico de Estabilidad para excavaciones del tipo ingreso del personal (Según Lang et.al., 1991).



Considerando el valor promedio de RMR de 55, es decir calidad Regular A (IIIA), se pueden excavar aberturas temporales de 7 m de ancho utilizando sostenimiento sistemático con pernos de roca, siempre y cuando no se den circunstancias de presencia de fallas geológicas u otros rasgos estructurales adversos antes señalados. En caso que ocurra esto último, el sostenimiento deberá ser más severo.

Para el caso de excavaciones de 6 a 7 m de abertura en masas rocosas de calidad Regular A (IIIA) será: pernos sistemáticos tipo split sets, de 8 a 10 pies de longitud,

espaciados cada 1.5 a 2.0 m. Para menores tamaños de aberturas solo se requerirá sostenimiento esporádico. Para aberturas de mayor tamaño será necesario hacer nuevas estimaciones del sostenimiento.

### 4.2.3. Tajeos

Para determinar las dimensiones de los tajeos consideramos aquí las dos siguientes modalidades: primero, del tipo de ingreso del personal dentro del tajeo; y segundo del tipo de no ingreso del personal dentro del tajeo. El análisis llevado a cabo en el Acápite 4.2.2.2 anterior es válido para el primer caso: del tipo de ingreso del personal dentro del tajeo.

En el segundo caso, inicialmente podemos utilizar los estimados de los abiertos máximos y los tiempos de autosostenimiento para labores temporales de las excavaciones que se muestran en el Cuadro 5.4, el cual cubre rango de calidades de masa rocosa que pueden darse en la mina Tambomayo, para ello hemos considerado relacionar los valores promedio de RMR y un valor de ESR igual a 3 para el caso de labores temporales.

**Tabla 23** *Aberturas máximas y tiempos de autosostenimiento para Tajeos*

Dominio	Rango RMR	Promedio RMR	Abertura promedio (m)	Tiempo de autosostenimiento
DE-II	> 60	65	17	1 mese
DE-IIIA	51 – 60	55	11	1 semana
DE-IIIB	41 – 50	45	7	30 horas
DE-IVA	31 – 40	35	4.4	5 horas

Este cuadro nos da una idea de las aberturas máximas de las excavaciones en general que se pueden aperturar como labores de preparación y explotación del mineral, y también los tiempos de autosostenimiento de los mismos.

Para este mismo segundo caso, excavaciones del tipo de no ingreso del personal dentro del tajeo, para el dimensionamiento de los mismos podemos utilizar el Método Gráfico de Estabilidad (MGE), tal como aparece en la publicación de Hoek, Kaiser y Bawden (1995) – Ref. 9. Este método fue desarrollado por Potvin (1988), Potvin y Milne (1992) y Nickson (1992), siguiendo los trabajos iniciados por Mathews et. al. (1981). La versión actual del método, basado en el análisis de más de 350 casos históricos recolectados de minas subterráneas canadienses, toma en cuenta los principales factores de influencia del diseño de tajeos. Información sobre la estructura y resistencia de la masa rocosa, los esfuerzos alrededor de la excavación, el tamaño, forma y orientación de la excavación, es utilizada para determinar si el tajeo será estable sin sostenimiento, o con sostenimiento, o inestable aún con sostenimiento. El método también es adecuado para el dimensionamiento del sostenimiento con cable bolt.

De manera muy resumida, el procedimiento de diseño aplicando este método está basado en el cálculo de dos factores:  $N'$  y  $S$ . El primero es el número de estabilidad modificado y representa la habilidad del macizo rocoso para permanecer estable bajo una condición de esfuerzo dado. El segundo es el factor de forma o radio hidráulico que toma en cuenta el tamaño y forma del tajeo.

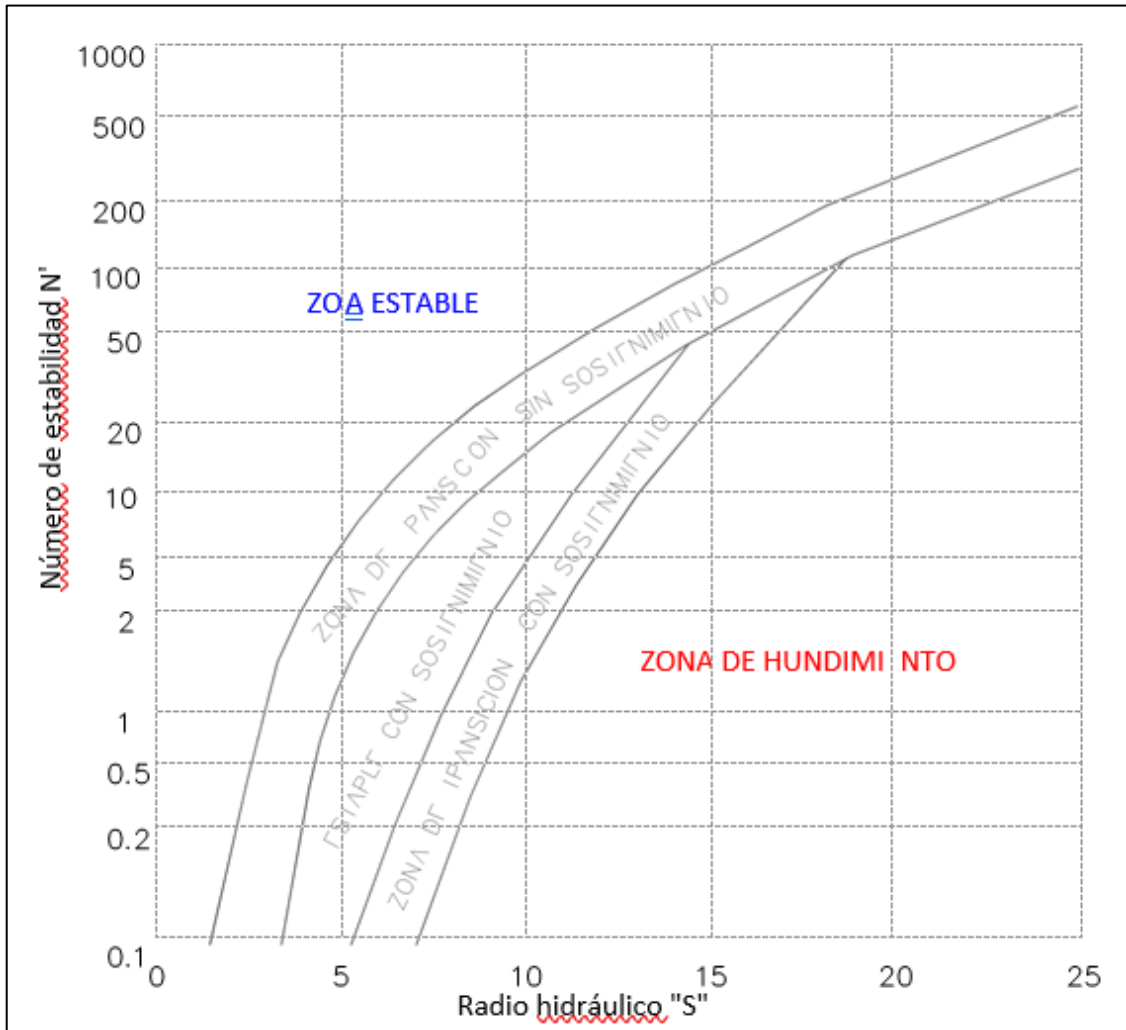
El número de estabilidad  $N'$  se define como:  $N' = Q' \times A \times B \times C$ , donde:

- $Q'$  es el Índice de Calidad Tunelera  $Q$  modificado
- $A$  es el factor de esfuerzo en la roca
- $B$  es el factor de ajuste por orientación de las juntas
- $C$  es el factor de ajuste gravitacional

El factor de forma o radio hidráulico  $S$ , para la superficie del tajeo bajo consideración, se obtiene dividiendo el “área de la superficie analizada” entre el “perímetro de la superficie analizada”. Usando los valores del número de estabilidad

$N'$ , y el radio hidráulico  $S$ , se puede estimar la estabilidad de un tajeo utilizando el “gráfico de estabilidad” presentado en la ilustración.

**Ilustración 11.** Gráfico de estabilidad. Según Potvin (1988), modificado por Nickson (1992)



Un aspecto importante a resaltar en esta metodología es la influencia del arreglo estructural de la masa rocosa, ya que los resultados son sensibles al parámetro  $B$ . Cuando se analiza una superficie como el techo de los tajeos o las paredes de los mismos, la junta crítica es el sistema que aparece de modo paralelo a la superficie en análisis. A medida que este sistema se muestra de modo oblicuo, es favorable para la

estabilidad del tajeo y esto permite que la longitud se incremente. La situación más favorable es cuando el sistema se halla perpendicular a la superficie analizada.

Para el caso del análisis en el techo, donde el buzamiento del mismo es  $0^\circ$ , el rumbo puede tomar cualquier valor para cualquier dirección de avance, la junta crítica será siempre el sistema subhorizontal o el de menor buzamiento. En tal sentido, para dicho análisis, el resultado encontrado para una dirección de avance en particular, significará el mismo resultado para cualquier otra dirección de avance del tajeo.

En el caso del análisis en las paredes de los tajeos, si importa conocer la dirección de avance, y el resultado en una dirección será distinta para cualquier otra, de aquí la importancia de definir las direcciones preferenciales de avance.

Para los cálculos se ha utilizado el software STOPESOFT desarrollado por Graeme Fitz (1999) y además se ha realizado la verificación del análisis en una hoja de cálculo en Excel.

Debido a la moderada calidad del macizo rocoso mineralizado, así como las cajas inmediatas, en mina Tambomayo se tiene ya establecidas dimensiones de tajeos en las tres vetas. En tal sentido, la evaluación geomecánica está orientada a realizar la verificación de dichas dimensiones y evaluar otras adicionales con la finalidad de establecer condiciones de estabilidad satisfactorias para el minado.

Las alturas de los tajeos que se manejan comúnmente en la mina son 16 y 17 m y los anchos de los tajeos varían generalmente de 4 a 8 m. Para esta evaluación consideraremos anchos de minado de 6, 8, 10 y 12 m, en el caso de las alturas los análisis se realizarán para 16, 17, 18 y 20 m de altura. En los anchos de tajeos menores a 6 m, los análisis de la estabilidad de los techos (corona) bajo esta metodología no son muy relevantes ya que la estabilidad de los mismos está condicionada al sostenimiento que se pueda aplicar durante la apertura de subniveles.

Estos análisis se han realizado en las tres estructuras mineralizadas (Mirtha, Paola y Paola Norte) considerando el alineamiento de los tajeos, varias longitudes de ellos fueron evaluados y los resultados fueron ploteados en el Gráfico de Estabilidad, a fin de observar si el diseño cae en la región “estable sin sostenimiento”, “estable con sostenimiento opcional” o “estable con sostenimiento obligatorio”, o en la región de “hundimiento”.

En los tramos donde la veta es mayor a 10 m se ha realizado la alternativa de minado transversal a la veta como es el caso en las vetas Paola y Paola Norte. En el Anexo 5 se presenta un resumen de los análisis realizados para cada veta.

### Veta Mirtha

Las máximas dimensiones recomendadas para los tajeos abiertos en la modalidad de no ingreso del personal son presentadas en la tabla.

**Tabla 24 Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Mirtha**

Condición de estabilidad	Análisis en el mineral (corona y paredes)								Análisis en estéril			
	Ancho de tajeo =				Altura de pared vertical =				Altura de caja techo =			
	6 m	8 m	10 m	12 m	16 m	17 m	18 m	20 m	16 m	17 m	18 m	20 m
Calidad del dominio DE-IVA												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIB												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIA												
ESS												
ESO												
ECS												

ESS = Estable Sin Sostenimiento

ESO = Estable Sostenimiento Opcional

ECS = Estable Con Sostenimiento obligado

sr: Significa (sin restricción) que no hay límite de longitud en la superficie analizada para dicha condición de estabilidad.

## Veta Paola

Las máximas dimensiones recomendadas para los tajeos abiertos en la modalidad de no ingreso del personal son presentadas en la Tabla 25.

**Tabla 25 Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola**

Condición de estabilidad	Análisis en el mineral (corona y paredes)								Análisis en estéril			
	Ancho de tajeo =				Altura de pared vertical =				Altura de caja techo =			
	6 m	8 m	10 m	12 m	16 m	17 m	18 m	20 m	16 m	17 m	18 m	20 m
Calidad del dominio DE-IVA												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIB												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIA												
ESS												
ESO												
ECS												

ESS = Estable Sin Sostenimiento

ESO = Estable Sostenimiento Opcional

ECS = Estable Con Sostenimiento obligado

sr: Significa (sin restricción) que no hay límite de longitud en la superficie analizada para dicha condición de estabilidad.

## Veta Paola Norte

Los resultados encontrados para la veta Paola Norte son resumidos en la tabla. Para este caso se ha considerado las diferentes alternativas en las que pueden presentarse la calidad de la masa rocosa tanto en el mineral y en las cajas críticas.

**Tabla 26 Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola Norte**

Condición de estabilidad	Análisis en el mineral								Análisis en estéril			
	ML y MT - Ancho de tajeo =				MT - Altura de pared vertical =				ML - Altura de caja techo =			
	6 m	8 m	10 m	12 m	16 m	17 m	18 m	20 m	16 m	17 m	18 m	20 m
Calidad del dominio DE-IVA												
ESS	7	5	-	-	6	6	5.5	5	6	5.5	5.5	5
ESO	16	13	-	-	14	13	12	12	15	14	13	12
ECS	-	-	-	-	25	24	22	20	25	24	23	21
Calidad del dominio DE-IIIB												
ESS	16	12	10	9	11	10	9	9	9	9	9	8
ESO	100	40	30	22	26	24	22	19	26	23	21	18
ECS	200	80	50	40	45	42	38	32	42	40	37	31
Calidad del dominio DE-III A												
ESS	45	30	20	18	22	20	18	16	16	16	15	14
ESO	sr	100	60	45	60	55	47	37	45	45	40	33
ECS	sr	sr	100	65	150	120	90	60	100	90	70	53

ML: minado longitudinal,

MT: minado transversal.

En Paola Norte, el mineral es por lo general del dominio DE-IIIB con sectores de la caja techo que se hallan entre DE-IIIB y DE-IVA. Cuando la veta es angosta, el tajeo será alineado al rumbo de la veta por lo que la caja techo puede estar en dominios DE-IVA o DE-IIIB. Lo crítico es cuando la calidad de la caja techo es del dominio DE-IVA, este hecho hace que la estabilidad del tajeo se haga crítica cuando se pretenda exponer tajeos de mayor longitud, en ese sentido la alternativa de utilizar cable bolting para reforzar el techo es una alternativa que está funcionando en la mina.

Según el cuadro, se puede observar que la longitud del tajeo es dependiente de la longitud de la caja techo en estéril o pared vertical en mineral, este último es cuando el minado se realiza transversal a la veta. Los resultados de los análisis en el techo cuando la calidad es del dominio DE-IVA no son contundentes ya que la metodología no es aplicable para este rango de calidad e inferiores, la estabilidad de los techos en este caso estará condicionada al sostenimiento que se coloque a medida que se aperturan los subniveles.

Por ejemplo, en el caso de tener un tajeo donde el mineral y la caja techo son del dominio DE-IIIB, para un ancho de minado de 8 m se puede alcanzar una longitud de 40 m en la condición ESO y para una altura de tajeo de 17 m se tendría una longitud de 23 m para la

misma condición, en resumen, el tajeo para el ancho y altura citadas podrá alcanzar solamente 23 m de longitud para la condición ESO, es decir la longitud final la define la menor longitud.

Para las mismas dimensiones iniciales de ancho y altura de tajeo citadas en el párrafo anterior, si la calidad de la caja techo fuera del dominio DE-IVA, la longitud del tajeo en la caja techo solo podrá alcanzar 14 m para la condición ESO, si se pretendiese tener mayor longitud se puede utilizar refuerzo con cable bolting y con ello se puede alcanzar hasta 24 m. Según la experiencia ganada en la mina, se ha observado que se están consiguiendo algo más de 24 m utilizando cable bolting y está dando resultados favorables.

#### **4.2.4. Estabilidad estructuralmente controlada**

La geometría tridimensional de las excavaciones en relación a la distribución espacial de las discontinuidades (fallas, diaclasas, estratos, etc.), las cuales constituyen planos de debilidad, influyen sobre las condiciones de estabilidad de cualquier excavación, por lo cual a este tipo de estabilidad se le denomina “estabilidad estructuralmente controlada”. Los planos de debilidad, al interceptarse, podrían formar cuñas o bloques rocosos en el techo y paredes de la excavación, presentando libertad para descolgarse, rotar o deslizarse.

Para evaluar esta influencia del arreglo estructural que presenta la masa rocosa de la mina Tambomayo sobre la estabilidad de las excavaciones, se ha realizado un análisis de estabilidad estructuralmente controlado, utilizando el programa de cómputo

UNWEDGE (Rocscience, 2004). Dicho análisis ha sido realizado de modo particular para cada veta.

Para ello se ha considerado la información desarrollada en los Acápites 4.2.3 (Distribución de discontinuidades) y 4.5.2 (Resistencia de las discontinuidades), además para la realización de este análisis se ha requerido conocer el alineamiento que tienen las excavaciones, al respecto se ha realizado el análisis para labores de avance siguiendo la dirección paralela a las vetas y las direcciones perpendiculares a las mismas. Los análisis han sido realizados tanto para la roca estéril y para la roca mineralizada utilizando la información particular de cada una de ellas. Para el caso de los tajeos, también se ha realizado el análisis considerando los mismos alineamientos.

A continuación, se hará una descripción particular para lo encontrado en cada veta. Hay que tener presente que este análisis es de mayor importancia cuando la calidad de la masa rocosa es de Regular B (DE-IIIB) a superiores.

### **Veta Paola Norte**

Para el caso de labores de desarrollo como los bypass y nieves principales, se ha realizado el análisis siguiendo el rumbo paralelo a la veta (NS) y también perpendicular (EW) al mismo. En este caso se ha considerado asumir una sección de 5 m de ancho y 4 m de altura.

Para la dirección NS se observa la formación de cuñas grandes e inestables en el techo y de cuñas delgadas y estables en las paredes. Para la estabilización de estas cuñas se requiere el uso de pernos de tipo barra helicoidal de 7 a 8 pies de longitud y espaciadas a 1.3 m.

Cuando las excavaciones siguen un alineamiento EW que es perpendicular al rumbo de la veta, se observa la formación de cuñas inestables en el techo que son de

tamaño mediano, así mismo hay formación de cuñas delgadas en las paredes que son estables. Para la estabilización de estas cuñas se requiere el uso de pernos de tipo barra helicoidal de 7 a 8 pies de longitud con espaciamientos de 1.7 m.

En el caso de las labores para los subniveles que tienen menor dimensión de aproximadamente 4 m de ancho y 3.5 m de altura, la formación de cuñas es similar a lo descrito para el caso de las labores de desarrollo, asumiendo las dos direcciones de avance.

Para las excavaciones que siguen alineamiento NS, las cuñas pueden ser estabilizadas con pernos tipo swellex o split set de 7 pies de longitud ubicados sistemáticamente a 1 m. En las excavaciones alineadas EW se requiere los mismos pernos espaciados a 1.5 m.

Para los tajeos también se ha analizado la formación de cuñas. Para ello se ha considerado un tajeo de 6 m de ancho y altura de 16 m. Se observa la formación de cuñas alargadas en el techo que son inestables y de cuñas grandes y delgadas en las paredes. Para la estabilización de estas cuñas se ha visto que colocando cablebolts de 4 a 5 de longitud y espaciados a 1.7 m se logra mantener la estabilidad de la caja techo y corona.

Los resultados de este análisis de estabilidad estructuralmente controlado, deben ser tomados en cuenta en adición a los sostenimientos anteriormente recomendados en el Acápite 5.2 (Aberturas máximas de las excavaciones y sostenimiento).

Hay que tener presente que este análisis solo contempla la información de los sistemas estereogramas, se muestra varias discontinuidades aleatorias y en consecuencia puede presentarse la formación de cuñas de modo local que requieran sostenimiento, los cuales deben ser manejados durante la operación.

#### **4.2.5. Estabilidad controlada por esfuerzos**

Para analizar la estabilidad controlada por los esfuerzos se han realizado modelamientos numéricos esfuerzo/deformación utilizando el software PHASE2 de Rocscience (2010). Los análisis han sido realizados simulando minado masivo con el método de minado de “Bench & fill” donde se utilizan taladros largos. Las dimensiones de los tajeos corresponden a las dimensiones actuales de minado que son tajeos de 4 a 8 m de ancho y de 15 a 17 m de altura.

##### **Veta Paola Norte**

Para este análisis se ha utilizado dos secciones representativas, la 060 y la 140 las cuales presenta diferentes calidades de masa rocosa.

En el caso de la Sección 060, el mineral se halla en calidad del dominio DE-III A y la caja techo en DE-IV A. En el caso de la zonificación realizada en la Ref.: 15 el mineral y caja techo se halla en calidad DE-III B, pero en la zona superior la calidad de la caja techo baja a DE-IV A.

En la Sección 140, encima del Nv. 4640, el mineral y caja tiene calidad del dominio DE-IV A y debajo del citado nivel la calidad es generalmente del dominio DE-III B.

Para el caso de la Sección 060, se ha creído conveniente realizar el análisis asumiendo calidad en el mineral del dominio DE-III A y en otro análisis con calidad DE-III B. Los resultados muestran que en todos los casos cuando los tajeos se hallan abiertos, la estabilidad en la caja techo es crítica lo que lleva a pensar que habría que adoptar algún tipo de sostenimiento.

Otra enseñanza de este modelamiento es que los tajeos no deben ser muy anchos, es decir no se recomendaría más de 10 m de ancho, ya que los resultados muestran que, para mayores anchos, la estabilidad de la corona se ve comprometida. La

estabilidad de la caja piso es satisfactoria en ambas calidades de masa rocosa, habiendo mayor deformación en el caso del dominio DE-IIIB que para el dominio DE-IIIA Así mismo para anchos mayores a 8 m se ha observado que estabilidad de los bancos de mineral que tienen entre 8 y 9 m de altura se pueden ver comprometidos debido a que la esbeltez (ancho/altura) aumenta.

Observando los resultados de la Sección 140, los tajeos que están simulados en el sector donde toda la roca es del dominio IVA, la estabilidad de las cajas se muestra crítica, lo que conlleva a anticipar que el minado en este tipo de terreno puede complicar la estabilidad de las excavaciones. En estos casos solo se podría minar si los tajeos son angostos ya que los subniveles tendrían sostenimiento obligatorio y la caja techo podría ser sostenida con cables bolts.

En la misma sección indicada, la simulación del minado encima del Nv. 4540 donde toda la roca es del dominio DE-IIIB, los resultados muestran condiciones aceptables de estabilidad lo que manifiesta que el método que se viene aplicando actualmente está correctamente aplicado.

Finalmente, en los modelamientos numéricos realizados se ha simulado el minado con tajeos de altura reales que están aplicando en la mina, que varía entre 16 a 17 m. Estos resultados también son argumentados con lo encontrado del MGE que ayuda a definir las longitudes adecuadas de tajeos.

Por otro lado, también se ha simulado en la Sección 140 el minado transversal de Paola Norte en las mayores potencias de la veta. Los resultados muestran que con ancho de tajeos de 8 m debajo del techo de relleno cementado en el NV. 4740 hay inestabilidad potencial en el techo de la excavación de relleno cementado de 1.7 MPa de resistencia, este hecho hace anticipar que minar con este ancho de tajeos debajo del Nv. 4740 no es conveniente. Si los tajeos se reduce a 4 m de ancho, las condiciones de

estabilidad de estos tajeos pequeños debajo del Nv. 4740 muestran condiciones de estabilidad moderadas lo que indica que pueden adoptarse tajeos con este ancho de 4 m. El tajeo debajo del Nv. 4740 luego de explotado se debe rellenar con relleno cementado y debe estar topeado al techo antes de abrir el tajeo adyacente. Si esta actividad del topeo no se realiza correctamente, se puede complicar la estabilidad del techo conformado por relleno cementado.

#### **4.3. Prueba de hipótesis**

Para el proceso de la prueba de la hipótesis se identificó las variables Independiente y Dependiente, las cuales fueron determinada para acepta la Hipótesis: Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

➤ **H0:** Evaluación Geomecánica.

➤ **H1:** Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo.

#### **4.4. Discusión de resultados**

##### **4.4.1. Selección del método de minado**

En los capítulos anteriores, se han definido las condiciones naturales del yacimiento: características geológicas, morfológicas (forma, potencia, rumbo y buzamiento, y profundidad debajo de la superficie), reservas (tamaño y distribución de leyes), geomecánicas (calidad de la masa rocosa de las cajas y del mineral, resistencia de la roca y esfuerzos), y las características de presencia del agua subterránea.

Tomando en cuenta la información concerniente a las condiciones naturales del yacimiento, se han aplicado diversas técnicas de selección del método de minado, como las de Boshkov and Wright (1973), Hartman (1987), Dravo (1974), Nicholas (1981) y UBC (University of British Columbia, 1995), este último es una versión modificada de la aproximación de Nicholas. Particularmente estos dos últimos criterios citados toman

en cuenta las condiciones naturales del yacimiento incidiendo en las condiciones geomecánicas de las rocas de cajas y del mineral.

Los resultados del proceso de selección del método de minado para cada una de las estructuras mineralizadas comprendidas en la presente evaluación han indicado lo siguientes:

### **Veta Paola Norte**

Según el criterio UBC, para el caso de Paola Norte, el proceso de jerarquización de los diferentes factores asociados a los diferentes métodos de minado subterráneo, indicó lo siguiente:

- El método de minado que se adapta mejor a las condiciones naturales encontradas, desde el punto de vista técnico, es el “corte y relleno” (Cut & Fill – C&F), para todo el rango de condiciones geomecánicas encontradas en Paola Norte, es decir para las rocas de los dominios DE-III A, DE-III B y DE-IV A.
- El método de minado “subniveles con taladros largos” (Sublevel Stopping – SLS) constituye una segunda alternativa para el minado de estas vetas, considerando asimismo todo el rango de condiciones geomecánicas encontradas en esta estructura mineralizada.

Según el criterio de Nicholas, también el método de minado que mejor se adapta a las condiciones naturales encontradas, desde el punto de vista técnico, es el C&F para todo el rango de condiciones geomecánicas presentes en Paola Norte. Para las rocas de inferior calidad considerando particularmente la caja techo del dominio DE-IV A el SLS queda descartado, pero para las rocas de mejor calidad (dominios DE-III A y DE-III B) el SLS queda como método de minado alternativo al C&F.

La aplicación de los otros criterios de selección del método de minado subterráneo, nombrados en el segundo párrafo de este acápite, arroja resultados similares a los mencionados con el criterio de Nicholas.

Según los análisis realizados en el capítulo anterior en relación a la estabilidad de las excavaciones y según las experiencias que se vienen teniendo actualmente en mina Tambomayo, el método de minado SLS con cableado de la caja techo en roca del dominio DE-IVA puede funcionar adecuadamente.

Desde el punto de vista económico, en el cuadro se presenta de manera referencial y en forma ordenada, de menos a más, los costos de minado correspondientes a los principales métodos de minado subterráneos. En líneas generales se debe tratar de buscar la aplicabilidad de los métodos a un yacimiento mineral en el orden enumerado, e ir descartando hasta encontrar el método aplicable más económico.

**Tabla 27** *Métodos de Minado Subterráneo en orden de costos*

<b>Orden</b>	<b>Método de minado</b>	<b>Abreviación</b>
1	Block ó Panel Caving	BC
2	Room and Pillar	R&P
3	Sub Level Stopping	SLS
4	Sub Level Caving	SLC
5	Cut and Fill Stopping	C&F
6	Vertical Crater Retreat	VCR
7	Top Slicing	TS
8	Shrinkage Stopping	SHS
9	Square Set Stopping	SQS

Por las condiciones naturales que presenta la veta Paola Norte, en particular por la morfología de la mineralización y sus relaciones espaciales, y por el tamaño pequeño de las reservas se descarta la aplicabilidad del BC. El R&P propiamente dicho también queda descartado principalmente por las condiciones morfológicas de la mineralización, sin embargo, el uso de pilares no debe descartarse de ser necesario, por ser complemento de la mayoría de los métodos de minado. El SLS es un método

alternativo según el proceso de selección efectuado. El SLC queda descartado por razones similares que el BC. El C&F es el método preferido. El resto de los métodos de minado tienen costos más altos que los anteriores, por lo que no es recomendable seguir con su evaluación.

#### **4.4.2. Métodos alternativos**

Según los análisis realizados en el acápite anterior, quedan entonces como alternativas principales para la explotación de las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte, los siguientes métodos de minado:

##### **Veta Paola Norte**

Quedan como alternativas el C&F y SLS. Actualmente se viene utilizando el método de minado SLS en su variante “banqueo y relleno” (Bench & Fill – B&F). A continuación, se presenta un análisis de mayor detalle para cada uno de estos métodos de minado.

##### **➤ Corte y Relleno - C&F**

El corte y relleno tiene un extenso rango de variaciones como resultado del minado selectivo, buena recuperación y practicabilidad bajo condiciones geomecánicas diversas, y se presta a la mecanización de la explotación. Las técnicas de relleno que actualmente se disponen, pueden mejorar los aspectos técnicos y económicos de este método de minado, que frecuentemente ha reemplazado a otros métodos. Esta alternativa de método de minado puede quedar como una opción a ser utilizada bajo condiciones geomecánicas adversas de la masa rocosa que puede presentarse durante el avance del minado.

Para las menores potencias, se puede aplicar la modalidad el C&F ascendente mecanizado a lo largo del rumbo de la veta teniendo como límite máximo de ancho de minado 6 a 7 m. Para las mayores potencias se puede

aplicar la modalidad de “corte y relleno con pilares” o lo que es lo mismo “cámaras y pilares con relleno” (Post Room & Pillar Mining – PR&PM) que utiliza solo relleno no cementado, o la modalidad “galerías y relleno” (Drift & Fill – D&F) que utiliza de manera total o parcial relleno cementado. Estas dos modalidades de minado de C&F son ascendentes.

Desde que los estándares del método de minado C&F son bastante conocidos en nuestro medio, en este informe no se dará más detalles sobre el mismo, concentrando la atención en métodos de minado alternativos, con los cuales se pueda tener al mismo tiempo seguridad y mayor eficiencia en la explotación.

➤ **Subniveles con taladros largos – SLS**

En las menores potencias del mineral, la aplicación del Método Gráfico de Estabilidad (Acápites 5.2.3) y los modelamientos numéricos realizados (Acápites 5.4) han indicado que para mantener condiciones satisfactorias de estabilidad local y global es necesario la utilización del relleno de tajeos, esto lleva a considerar el método de minado “banqueo y relleno” (Bench & Fill – B&F) o denominado también AVOCA.

El B&F es un método híbrido entre el SLS y el C&F, y más productivo que el C&F, aplicado cuando las condiciones geomecánicas lo permitan, generalmente en estructuras mineralizadas donde las cajas no son de buena calidad como es el caso de la caja techo de Paola Norte que generalmente es de calidad del dominio DE-IVA. Actualmente se viene utilizando este método de minado en Paola Norte en las menores potencias de la estructura mineralizada.

El B&F se caracteriza por llevar el minado de manera longitudinal a la veta, se construyen subniveles (inferior y superior) dejando un banco de

mineral entre ambos, el mismo que es minado progresivamente mediante taladros largos. Conforme se va rompiendo el mineral del banco por un frente, en retirada, y se va limpiando el mismo por el subnivel inferior, se va rellenando el tajeo por el otro frente desde el subnivel superior, con relleno detrítico de preferencia seco, de esta manera se limita la longitud de las cajas expuestas, el relleno realiza el sostenimiento de las cajas.

Durante el proceso del minado por B&F se deberá sostener adecuadamente los subniveles y todas las labores lineales circundantes al tajeo, de acuerdo a las recomendaciones dadas en el Acápite 5.2.

Para las mayores potencias la modalidad de SLS que puede utilizarse en Paola Norte es el “subniveles ascendentes con relleno cementado” (SARC). Este minado se caracteriza por ser transversal al rumbo de la estructura mineraliza. Más adelante se dan mayores detalles de esta modalidad de método de minado.

#### **4.4.3. Métodos de minado propuestos**

##### **Veta Paola Norte**

De acuerdo a lo anteriormente señalado, para las menores potencias se propone aquí como método de minado de Paola Norte el método de minado B&F. Para las mayores potencias se propone el SARC, quedando también como alternativa el D&F, que podría aplicarse en casos especiales como por ejemplo la recuperación del banco de mineral ubicado entre los subniveles 4772 y 4785 que se presenta en el Anexo 8 de este informe.

En la figura siguiente se muestra la distribución de áreas de menor y mayor potencia de la veta Paola Norte, determinada a partir de la información suministrada por el personal de mina Tambomayo a DCR:

**Ilustración 12** Estimación de potencias del mineral en veta Paola Norte, por secciones y niveles. Vista mirando al oeste

< Sur Sección	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	Norte 220	> 240
Nivel												
4870	5											
4840	5											
4810	5	14										
4790	5	10										
4773	7	16										
4740	4	15	15	3	3.2							
4725		13	12	10	5	5.6	4					
4690		10	8	12	5	4.4	4.7					
4685		2.1	5	6.5	17	4.4	4.2					
4673		5.4	5	6.5	20	16	4.2					
4640				5		3.3	4	2.4				
4625				5		2.2	5	2.4	3			
4613				7		2	4.7	4.7	3	3.4	5.7	
4590				5			2.7	4.7	3.4	2.8	5.7	
4573				5			2.5	3.7	3.4	2.8	3.2	
4540							2.5	3.7	2.8	3.6	3.2	
4560							3.6	3.4	2.1	3.6	2.5	2.8
4540							3.6	3.4	2.1	3.6	2.5	2.8

Según esta figura, las potencias menores, dónde se aplicaría el método de minado B&F ocurren en los siguientes lugares:

- Sección 20, entre los niveles 4740 y 4870.
- Secciones 40 a 80, entre los niveles 4640 y 4685.
- Secciones 100 a 120, entre los niveles 4690 y 4740.
- Sección 140, entre los niveles 4673 y 4725.
- Secciones 80 a 240, toda la veta debajo del nivel 4640.

En todas estas áreas la potencia del mineral de Paola Norte por lo general es menor que 6 m, excepcionalmente puede alcanzar los 7 m. El B&F funcionaría adecuadamente, con refuerzo de cablebolts en la caja techo de las rocas del dominio DE-IVA.

En la Ilustración 14 también se muestra las áreas de mayores potencias de la veta Paola Norte, estas ocurren en los siguientes lugares.

- Secciones 40 a 80, entre los niveles 4690 y 4810.
- Secciones 100 a 120 entre los niveles 4673 y 4685.

En estas áreas el minado deberá ser transversal al rumbo de la estructura mineralizada utilizando el método de minado SARC.

#### **4.4.4. Parámetros del Método de minado de Veta Paola Norte**

##### *Método de minado B&F*

##### **Ubicación de las labores de acceso y servicios permanentes**

Según los resultados de la clasificación y de la zonificación geomecánica de la masa rocosa en las distintas vetas, las excavaciones permanentes deben de preferencia ubicarse en las cajas alejadas, de preferencia hacia la caja piso teniéndose en cuenta que la calidad de la masa rocosa mejora a medida que nos alejamos de las vetas, en estos sectores la calidad se sitúa en los dominios DE-IIIB y DE-IIIA.

##### **Esquema de minado y dimensiones de tajeos**

El esquema de minado típicos del método B&F, es el que actualmente se utiliza en la mina Tambomayo. Para el dimensionamiento del minado se toma en cuenta los diferentes aspectos tratados en el Acápite 4.2 en relación a las aberturas máximas de las excavaciones y el sostenimiento y a los modelamientos numéricos llevados a cabo.

En cuanto al ancho de los tajeos, este dependerá de la potencia de la veta, el ancho variará de acuerdo a lo señalado en la ilustración, este ancho será a lo más 6 m y excepcionalmente 7 m. En relación a la altura de los tajeos, esta se tendrá que adecuar a lo que ya se tiene construido en mina

Tambomayo, subniveles de 16 a 17 m de altura piso a techo, considerando subniveles de 3.5 m de altura. Se puede adoptar otras alternativas de alturas de tajeos utilizando como guía el cuadro.

En relación a la longitud de los tajeos, la distancia máxima que se debe conservar entre el frente de rotura del mineral y la cresta del relleno debe ser a lo más 24 m para altura de bancos de 9 a 10 m.

Respecto a la longitud del block de minado, no hay restricciones desde el punto de vista geomecánico, por lo que este parámetro será establecido de acuerdo a los procedimientos operacionales.

### **Relleno**

Según los diferentes aspectos mencionados en el acápite precedente, habrá necesidad de utilizar principalmente relleno convencional o no cementado. En el método de minado B&F es recomendable el uso de relleno detrítico, de preferencia seco o con mínima humedad.

Para dar a la mina mejores condiciones de estabilidad local y global sería recomendable construir con el avance del minado pilares artificiales tanto de rumbo como de buzamiento, con relleno cementado, para mejorar también de esta manera la recuperación de las reservas de mineral. Estos pilares serán dimensionados más adelante.

### **Secuencia de avance del minado**

El minado con el método de B&F que actualmente se utiliza en mina Tambomayo y de acuerdo a lo analizado realizados en la presente investigación es que más se adecua. Lo ideal es comenzar el minado en la parte más profunda del yacimiento y entre dos subniveles avanzar de manera longitudinal y horizontal, completado el minado de un horizonte se inicia el

minado del horizonte superior. También con este método de minado se puede minar en horizontes múltiples, es simplemente establecer un ciclado adecuado y la construcción de los accesos correspondientes para la extracción del mineral y para el relleno. En caso de que no se sea posible iniciar el minado desde la parte más profunda del yacimiento, se puede comenzar de cualquier nivel, esto obligará a dejar un pilar puente de mineral que posteriormente se podrá recuperar colocando por ejemplo una losa de relleno cementado.

### ***Método de Minado SARC***

#### **Ubicación de las labores de acceso y servicios permanentes**

Similar al B&F y por las mismas razones señaladas las labores de acceso y servicios deberán ubicarse en la caja piso. Un ejemplo del método SARC se presenta en la recuperación del banco de mineral ubicado entre los subniveles 4772 y 4785.

#### **Esquema de minado y dimensiones de tajeos**

Se debe tener en cuenta que en el mineral de Paola Norte de las partes de mayor potencia predomina la masa rocosa del dominio DE-IIIB, en la caja techo predomina DE-IVA y en la caja piso hay rocas de los dominios DE-IIIB y DE-IIIA. Según ello y de acuerdo a los análisis realizados en el Acápite 4.2, el ancho de los tajeos dependerá de las condiciones de la caja techo (al oeste).

De acuerdo a lo señalado en el párrafo anterior un ancho adecuado de tajeos podría ser 6 sin refuerzos con cables bolts u 8 m con refuerzos de cables bolts en la caja techo. La altura de los tajeos establecida por Buenaventura varía de 16 a 17 m, los subniveles ya se encuentran o

preparados o en preparación, teniéndose un banco de mineral de 9 a 10 m. La longitud de los tajeos estará en función de la potencia del mineral. Según la Ilustración 14 la máxima potencia puede llegar a 20 m. Es recomendable que, en este caso, para el inicio del minado se abra solo la mitad de la longitud del tajeo a manera de pilotaje, después de las experiencias que se tengan con el minado se podrá abrir en toda la longitud de ser el caso.

### **Relleno**

La principal función que deberá cumplir el relleno es mantener paredes auto estables cuando se mine en mineral del costado, lo cual significa tener un relleno estructural conformado por relleno cementado, para ello, según la configuración de este método de minado es necesario que el relleno cementado tenga una resistencia compresiva uniaxial de 600 KPa.

### **Secuencia de avance del minado**

La secuencia de avance del minado denominado “secuencial ascendente y en retirada”. Desde el punto de vista de los análisis realizados esta es la secuencia de avance más adecuada para veta Paola Norte en sus mayores potencias. Los derrumbes ocurridos anteriormente encima del nivel 4740 se debieron entre otros a la aplicación de una secuencia de avance del minado inadecuada.

### ***Método de minado D&F***

### **Ubicación de las labores de acceso y servicios permanentes**

Similar al B&F y SARC y por las mismas razones señaladas las labores de acceso y servicios deberán ubicarse en la caja piso.

### **Esquema de minado y dimensiones de tajeos del B&F**

De acuerdo al esquema de minado de este método de explotación, denominado Over Hand Drift & Fill (OHD&F) por ser la modalidad ascendente del D&F. Las dimensiones de los tajeos pueden variar de 4 a 5 m igualmente la altura de los mismos.

Este método se utilizaría en las potencias mayores en condiciones geomecánicas desfavorables de la masa rocosa y en situaciones especiales como es la recuperación del banco de mineral ubicado entre los subniveles 4772 y 4785.

### **Relleno**

Es necesario utilizar relleno cementado por lo menos en los tajeos primarios, la resistencia del mismo puede ser alrededor de 300 kPa. Los tajeos secundarios, previa evaluación geomecánica pueden ser rellenados solo con relleno detrítico sin cemento.

### **Secuencia de Avance del Minado**

En la secuencia de avance del minado. Primero salen los tajeos primarios, rellenándose luego con relleno cementado. Después salen los pilares dejados (tajeos secundarios) y se rellenan o con relleno cementado o con relleno sin cementar según indique la evaluación geomecánica previa.

#### **4.4.5. Consideraciones Finales**

La dilución y recuperación para el caso del B&F dependen de la calidad de la masa rocosa de las cajas y del mineral. Cuando la masa rocosa es de mala calidad la dilución es mayor y la recuperación es menor y viceversa. Las experiencias que vienen habiendo en Perú indican diluciones en el rango de 10 a 15 % y recuperaciones de alrededor de 85 %. También influye en la dilución la potencia de la veta, a menores

potencias mayor dilución y menor recuperación y viceversa. También en este caso será muy importante realizar cuidadosos diseños y estándares de ejecución de la perforación y voladura controlada, para mantener principalmente la estabilidad adecuada de las cajas de los tajeos, principalmente de la caja techo.

En cuanto al método de minado SARC, las experiencias que se tienen en Perú indican que la dilución puede estar alrededor de 5 % y la recuperación alrededor de 90 %. Similares valores de dilución y recuperación pueden lograrse con el D&F.

Los ingenieros de Planeamiento y Diseño del Minado de Mina Tambomayo, tendrán que evaluar la factibilidad técnica económica de las alternativas de métodos de minado propuestos en este informe, tomando en cuenta los diferentes aspectos tratados y el nivel de producción que establezca Buenaventura.

## CONCLUSIONES

- La columna litoestratigráfica regional del área en estudio abarca diversas formaciones geológicas, desde rocas del Precámbrico hasta depósitos Cuaternarios. Estas incluyen rocas del Mesozoico (Jurásico-Cretácico) y Cenozoico (Terciario-Cuaternario), con la presencia de pulsaciones de domos volcánicos y cuerpos intrusivos menores. Destaca el Arco Volcánico Terciario-Cuaternario, en el cual los Volcánicos Santa Rosa juegan un papel clave debido a que contienen la mineralización asociada al proyecto Tambomayo.
- A nivel local, el área del proyecto está constituida por una extensa y compleja secuencia de actividad volcánica, que incluye rocas efusivas, fragmentales, volcanoclásticas y depósitos de avalanchas o lahares. Estos materiales forman un posible estratovolcán de varios kilómetros de diámetro. Los afloramientos en el área están compuestos por tufos, brechas, lavas y lahares, con composiciones que van desde traquiandesitas hasta dacitas, lo que subraya la diversidad litológica del entorno.
- El área de estudio está controlada estructuralmente por un sistema de fallas de rumbo Andino NW-SE, que ha generado fallas tensionales con dirección E-W. Estas fallas son cruciales para la mineralización, ya que concentran vetas epitermales de baja a intermedia sulfuración. Las principales estructuras mineralizadas evaluadas en el proyecto corresponden a la veta Mirtha, la veta Paola y la veta Paola Norte, todas ellas de gran relevancia económica.
- Las litologías simplificadas de la masa rocosa asociada a las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte indican que la mineralización se encuentra en brechas de cuarzo. En los tres casos, la caja techo está compuesta principalmente por tobas andesíticas y toba brecha andesítica, mientras que la caja piso exhibe lavas andesíticas. En particular, para la veta Paola Norte, tanto la caja techo como la caja piso están conformadas por toba andesítica y toba brecha andesítica, ya que esta veta se localiza al norte de la falla Norte y de la veta Mirtha. Esta

distribución geológica sugiere un control estructural directo sobre la mineralización, influenciada por las características litológicas de las rocas anfitrionas.

- La caracterización regional y local de la geología del área del proyecto Tambomayo, en conjunto con su control estructural y características litológicas, proporciona una base sólida para comprender la distribución de las vetas mineralizadas. Las formaciones volcánicas y el control tectónico desempeñan un papel determinante en la localización de las vetas, lo que es crucial para la planificación y desarrollo de futuras actividades mineras en la zona.

## RECOMENDACIONES

- En este estudio se han identificado los métodos de minado subterráneo alternativos adecuados para la explotación de las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte, basándose en un análisis técnico de factibilidad y con un enfoque geomecánico. El personal de la mina Tambomayo ha estado ganando experiencia en estos métodos, y esta experiencia, combinada con los parámetros de diseño geomecánico proporcionados en este informe, permitirá optimizar la operación minera, haciéndola más segura y eficiente. Se recomienda seguir perfeccionando estas prácticas en función de las condiciones específicas de las vetas.
- Interacción entre Ingenieros: Para garantizar el uso adecuado de la información geomecánica desarrollada en este estudio, es esencial que exista una interacción continua y coordinada entre los ingenieros responsables de la planificación y diseño del minado y los ingenieros geomecánicos. Esta colaboración asegurará que el apoyo geomecánico se aplique de manera eficaz, mejorando tanto la seguridad como la eficiencia en las operaciones subterráneas.
- Se detallan los diversos parámetros de diseño geomecánico relacionados con los métodos de minado propuestos. Estos incluyen el esquema de minado, el dimensionamiento de las labores, la secuencia de avance y consideraciones críticas para la planificación y diseño del minado en las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte. Es importante que estos parámetros sean seguidos rigurosamente para garantizar la estabilidad y eficiencia de las operaciones.
- Estabilización de Cuñas: Los análisis sobre la influencia del arreglo estructural de la masa rocosa en las condiciones de estabilidad de las excavaciones han indicado que es probable la formación de cuñas en techos y paredes. Se debe prestar especial atención a las recomendaciones para manejar de manera adecuada la estabilización de estas cuñas, y su identificación in-situ durante las operaciones mineras será fundamental para evitar riesgos.

La implementación de medidas preventivas y correctivas contribuirá a la seguridad general de las excavaciones subterráneas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski Z.T. “Engineering Rock Mass Clasification” Wiley – Interscience Publication – 1989.
- Brady B.H.G. & Brown E.T. “Rock Mechanics for Underground Mining” George Allen & Unwin – London – 1985.
- Brown E.T. “Rock Characterization Testing and Monitoring” ISRM Suggested Methods – Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics – 1981.
- CEDIMIN. “Geología del Proyecto Tambomayo”. Informe elaborado por el Departamento de Geología del Proyecto Tambomayo. Enero 2013.
- Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. “Información Geológica, Planos y Secciones e Información Topográfica” Proporcionada al personal de DCR Ingenieros S.R.Ltda. para la presente evaluación. Febrero – marzo 2018.
- Córdova Rojas David. “Asesoramiento geomecánico en Mina Iscaycruz”. Informes Técnicos varios preparados para Empresa Minera Los Quenuales S.A. entre los años 1998 y 2012.
- DCR Ingenieros S.R.Ltda. “Evaluación Geomecánica para el Minado – Proyecto Tambomayo”. Informe Técnico preparado para Compañía de Exploraciones, Desarrollo e Inversiones S.A.C. marzo 2003.
- Heidbach O. et.al. “World Stress Map” 2009 – 2nd edition, based on the WSM database release 2008. Helmholtz Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences.
- Hoek E., Kaiser P., Bawden W. “Support of Underground Excavations in Hard Rock” A.A. Balkema 1995.

- Hoek E. "Practical rock engineering" Rocscience, 2002.
- Hustrulid W.A. and Bullock R.L. "Underground Mining Methods: Fundamentals and International Case Studies" SME – 2001.
- INGEMMET. "Geología del Perú" Serie A: Carta Geológica Nacional. Octubre 1995.
- Lulea University of Technology. "Mining with backfill" Proceedings of the International Symposium on Mining with Backfill. Lulea – Sweden. June 1983.
- SME (Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc). "MINEFILL 2001".  
Proceedings of the 7TH International Symposium on Mining with Backfill.
- VICOR Ingenieros. "Estudio Geomecánico del Proyecto Minero Tambomayo". Informe Final preparado para Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. noviembre 2015.
- VICOR Ingenieros. "Estudio de Actualización del Modelo Geomecánico del Macizo Rocosó de la Mina Tambomayo". Informe Final preparado para Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. junio 2017.
- Villaescusa Ernesto. "Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping". Western Australian School of Mines. CRC Press Taylor & Francis Group. 2014.
- Weiss F. y Córdova D. "Influencia de las condiciones naturales en la selección del método de explotación en minería subterránea", Informe INGEMMET – 1991.

## **ANEXOS**

## INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

### TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS (FÍSICOS)

Aquí se detallan las técnicas empleadas y los materiales físicos utilizados para obtener la información en campo y laboratorio.

<b>TÉCNICAS</b>	<b>INSTRUMENTOS / MATERIALES</b>
<b>OBSERVACIÓN DIRECTA</b>	Recorrido por las labores de la mina para obtener información visual in situ.
<b>MAPEO GEOMECÁNICO</b>	Mapeadores y formatos de registro bajo normas ISRM para el logueo de testigos y mapeo de afloramientos.
<b>MEDICIÓN ESTRUCTURAL</b>	Brújula para determinar la orientación de discontinuidades.
<b>ENSAYOS DE RESISTENCIA</b>	Martillo de geólogo y Martillo de Schmidt para estimar la resistencia de la roca intacta.
<b>LEVANTAMIENTO FÍSICO</b>	Estación Total y Planos Topográficos de la unidad minera.
<b>REGISTRO VISUAL</b>	Cámara fotográfica para documentación de las condiciones de la masa rocosa.
<b>INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL</b>	Recopilación bibliográfica de la data histórica de la empresa y libros técnicos.

## **INSTRUMENTOS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS (SOFTWARE)**

La tesis utiliza herramientas informáticas especializadas como instrumentos fundamentales para el análisis de los datos recolectados.

<b>INSTRUMENTO (SOFTWARE)</b>	<b>FUNCIÓN PRINCIPAL EN LA INVESTIGACIÓN</b>
<b>DIPS (V. 1995 / 5.103)</b>	Procesamiento de datos, orientaciones y análisis estereográfico de las familias de discontinuidades.
<b>PHASE2</b>	Modelamiento numérico de esfuerzo/deformación para analizar la estabilidad de las excavaciones.
<b>UNWEDGE</b>	Análisis de estabilidad estructuralmente controlada (formación y caída de cuñas).
<b>ROCLAB</b>	Estimación de los parámetros de resistencia de la masa rocosa bajo el criterio de Hoek & Brown.
<b>STOPESOFT</b>	Cálculos para el dimensionamiento de tajeas mediante el Método Gráfico de Estabilidad (MGE)
<b>SPSS / MS EXCEL</b>	Tratamiento estadístico general de los datos obtenidos en la investigación.

## Matriz de Consistencia

<b>MATRIZ DE CONSISTENCIA</b>						
<b>TÍTULO: Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.</b>						
<b>Tesista:</b> Bach.						
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO Y NIVEL DE INVEST
<p><b>GENERAL:</b> ¿Es posible efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?</p> <p><b>Problemas Específicos</b></p> <p>A. ¿Cómo influye la aplicación de la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo?</p> <p>B. ¿Cómo obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo?</p>	<p><b>GENERAL:</b> Efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>A. Aplicar la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo.</p> <p>B. Obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo</p>	<p><b>GENERAL</b> Con la Evaluación Geomecánica se determinará el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b></p> <p>A. Con la aplicación de la evaluación geomecánica se realizar la explotación de la Mina Tambomayo.</p> <p>B. Con los Parámetros Geotécnicos, realizaremos un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo.</p>	<p><b>INDEPENDIENTE</b></p> <p>X: Evaluación Geomecánica de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.</p> <p><b>DEPENDIENTE</b></p> <p>Y: Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.</p>	<p>Evaluación</p> <p>Identificación</p> <p>Operaciones</p> <p>Mapeo</p> <p>Diseño</p> <p>Control</p> <p>Sostenimiento</p>	<p>Mina Tambomayo Compañía de Minas Buenaventura. Método de Minado Sostenimiento. Zonificación de la mina. Parámetros Geotécnicos. Mapeo Geomecánico. y Estructural. Mallas por tipo de roca.</p>	<p><b>TIPO:</b> Aplicada.</p> <p><b>NIVEL:</b> Evaluativa.</p>

# Arreglo Estructural de la Masa Rocosa

## ANALISIS ESTEREOGRAF. EN VETA MIRTHA - CAJA TECHO Y MINERAL

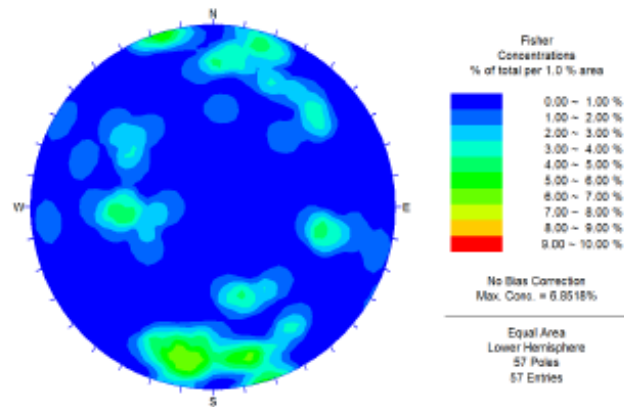


Figura 1: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

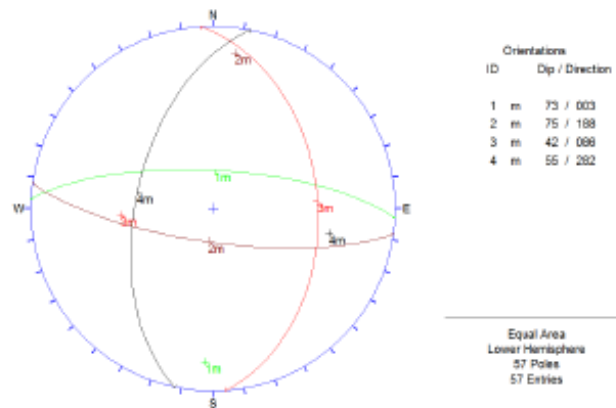


Figura 2: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

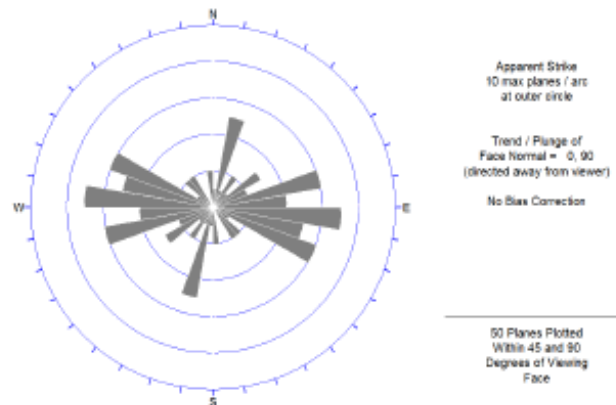


Figura 3: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA MIRTHA - CAJA PISO

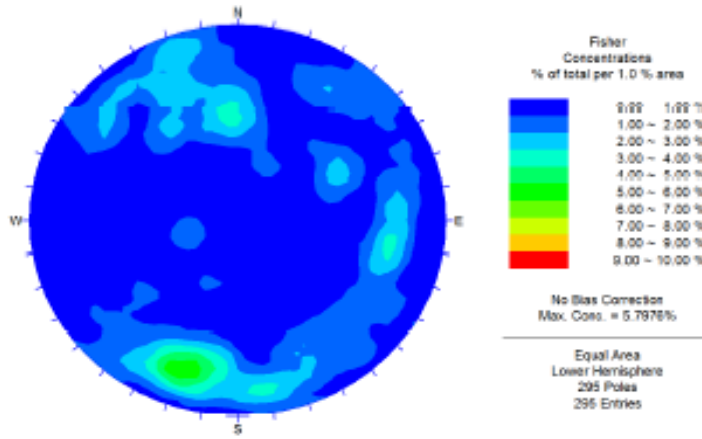


Figura 4: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

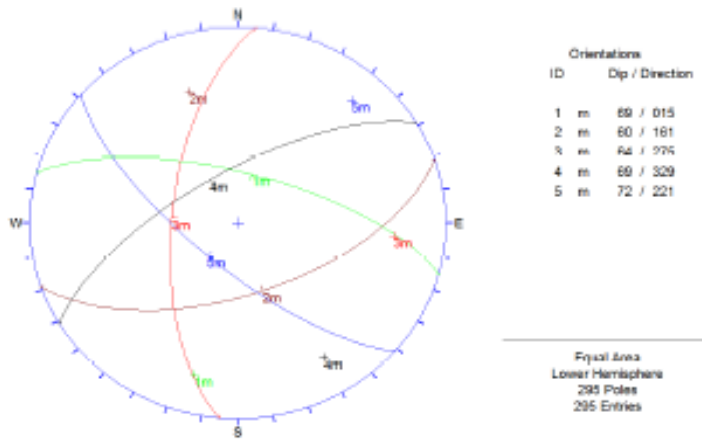


Figura 5: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

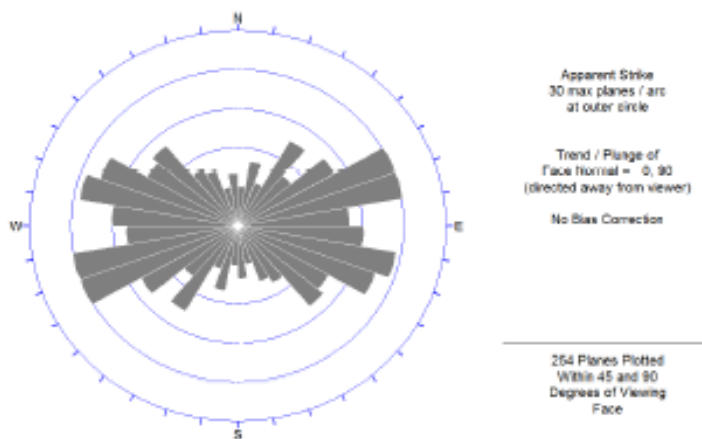


Figura 6: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA - CAJA TECHO

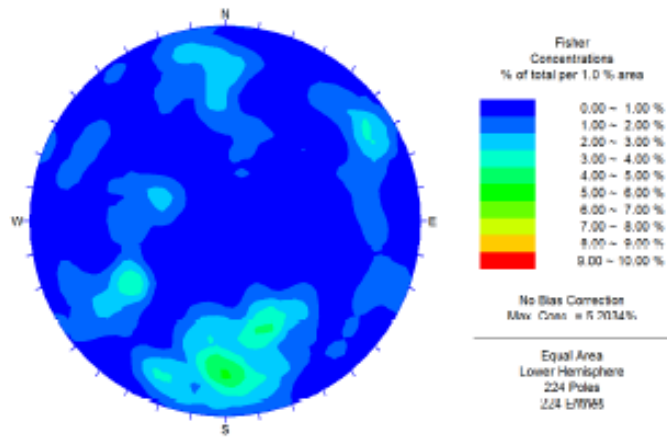


Figura 7: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

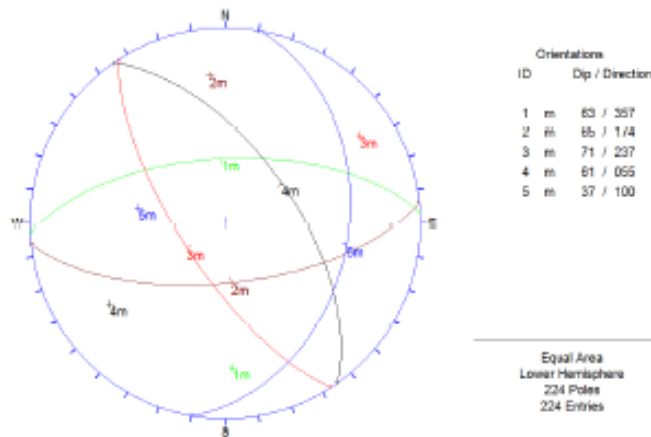


Figura 8: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

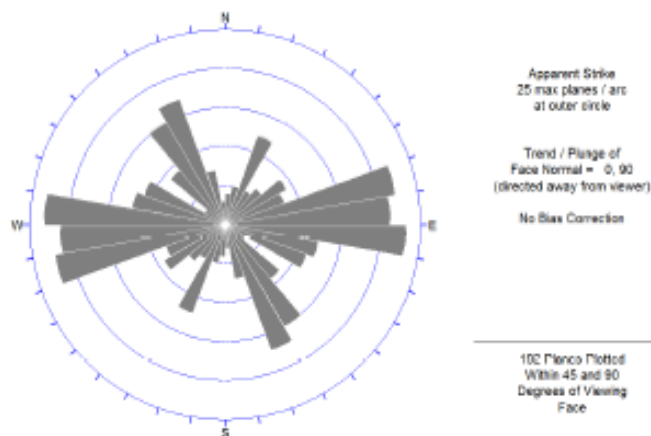


Figura 9: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA - MINERAL

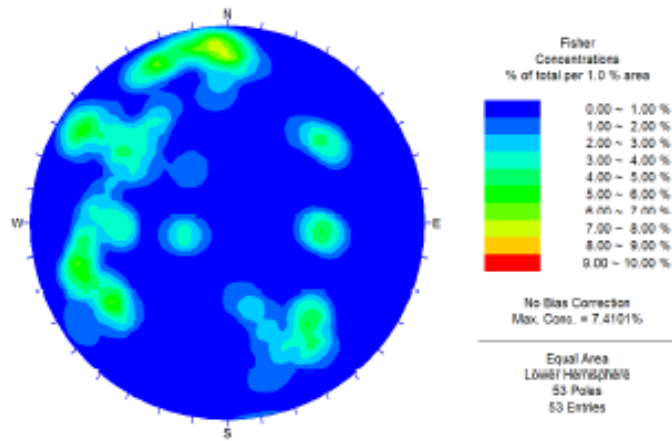


Figura 10: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

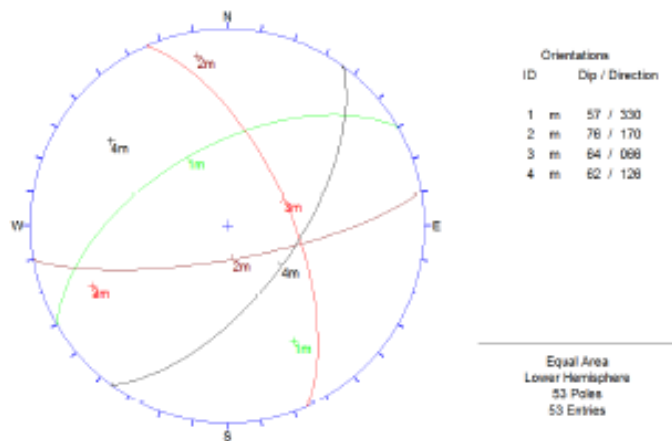


Figura 11: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

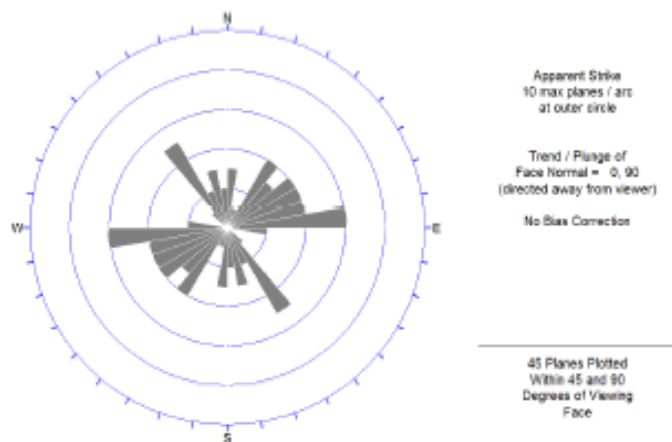


Figura 12: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA - CAJA PISO

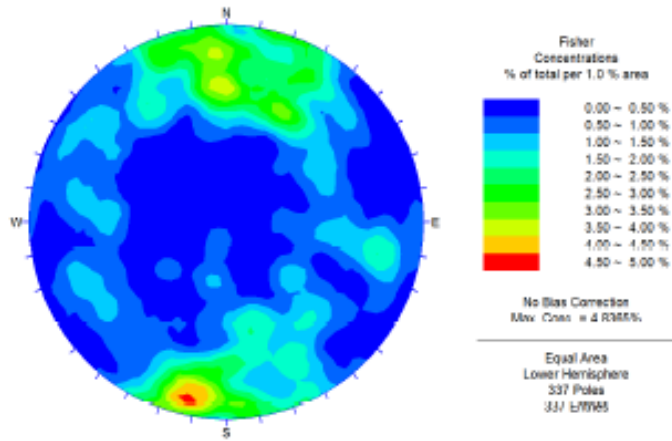


Figura 13: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

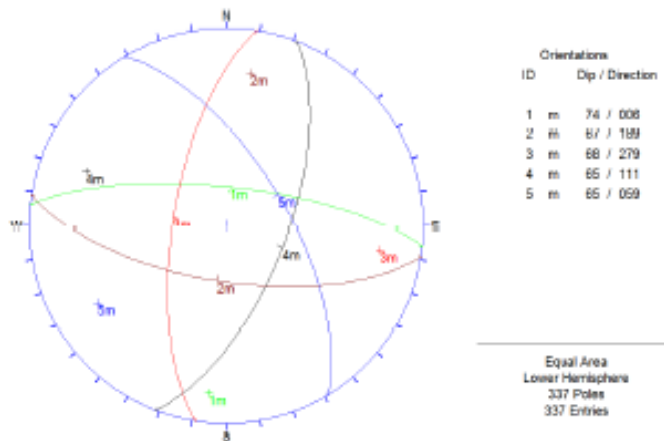


Figura 14: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

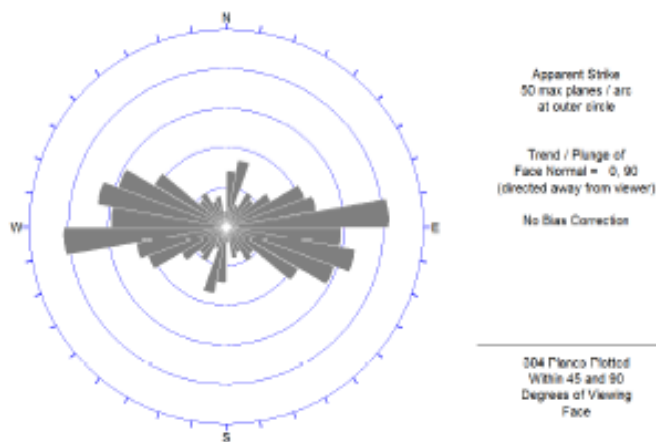


Figura 15: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA NORTE - CAJA TECHO

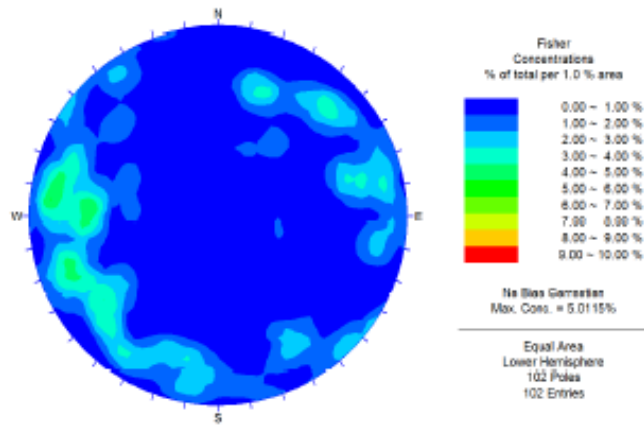


Figura 16: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

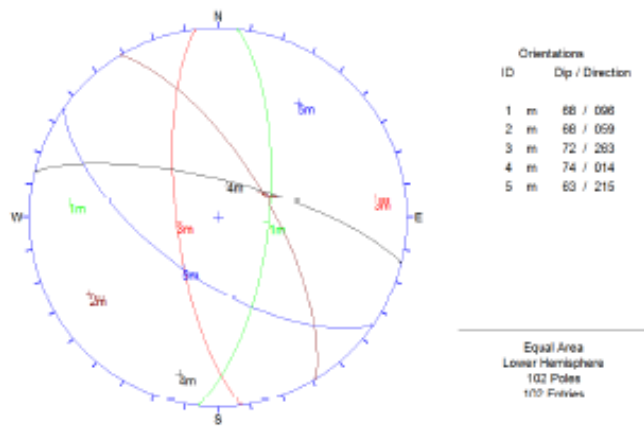


Figura 17: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

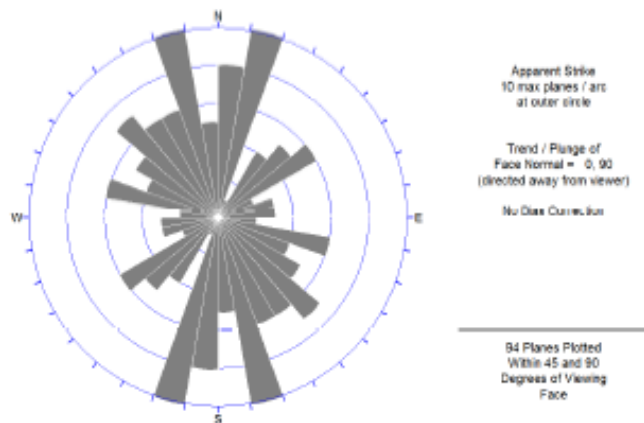


Figura 18: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA NORTE - MINERAL

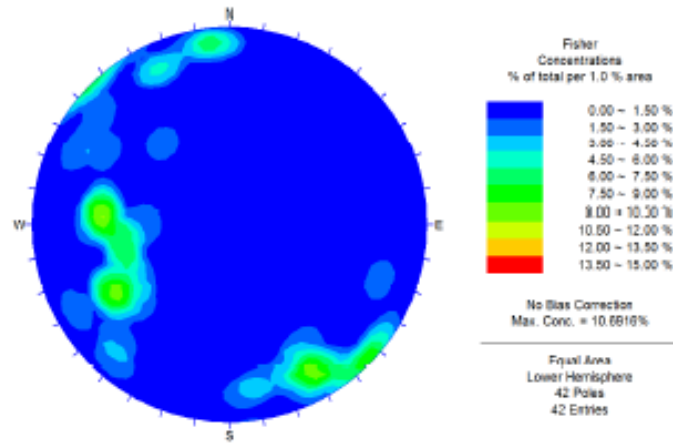


Figura 19: Diagrama estereográfico de contornos del compósito de discontinuidades.

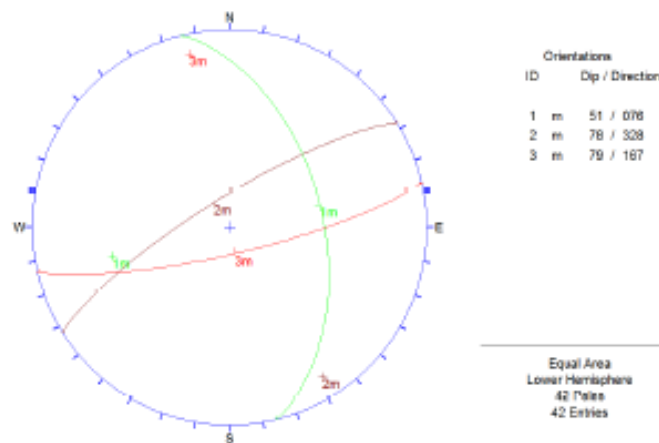


Figura 20: Diagrama estereográfico de planos principales del compósito de discontinuidades.

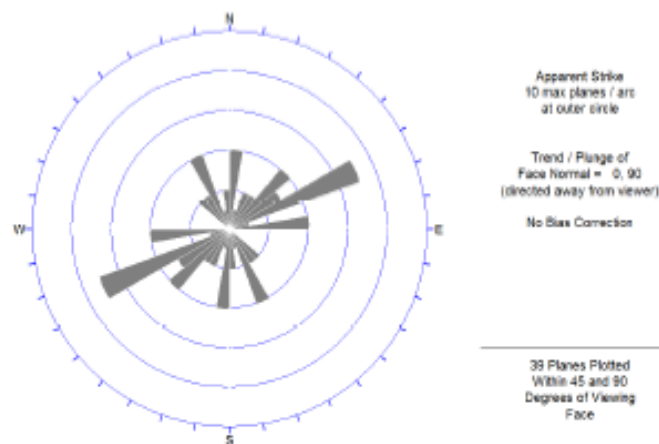


Figura 21: Diagrama de roseta del compósito de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA NORTE - CAJA PISO

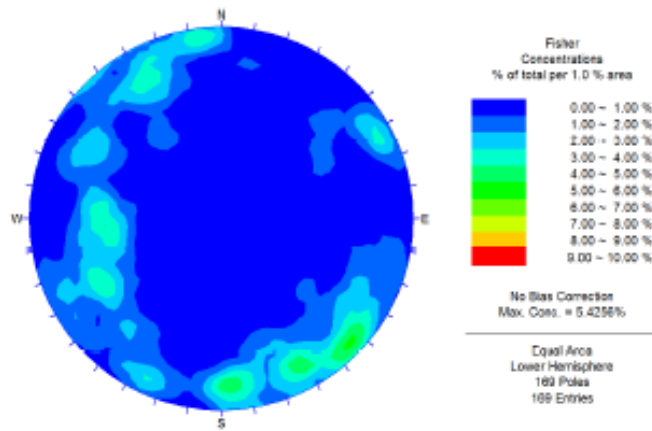


Figura 22: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

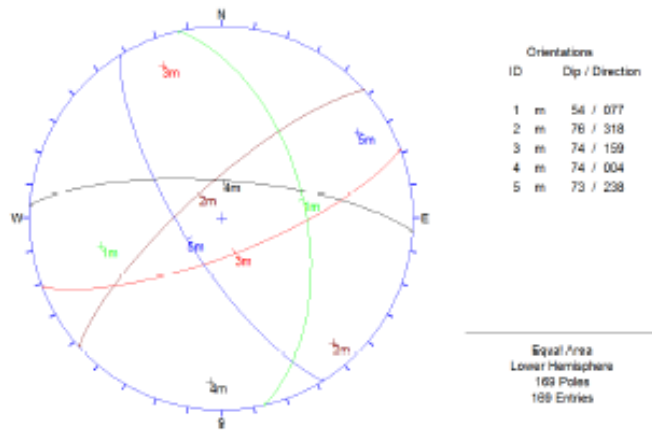


Figura 23: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

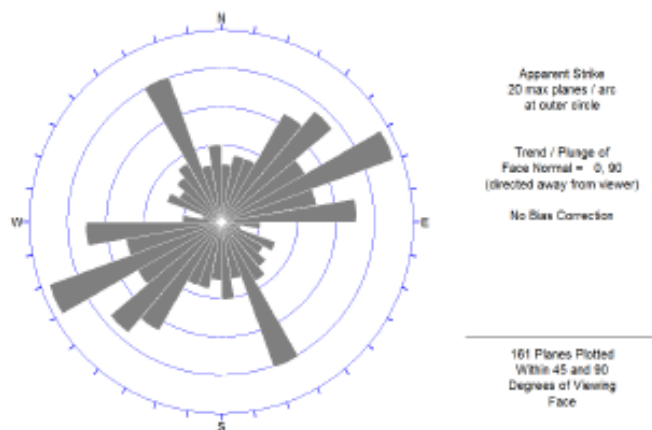


Figura 24: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.