



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
MAGISTER EN GESTIÓN MINERA
ESCUELA DE NEGOCIOS MINEROS**



**Evaluación del impacto técnico-económico del incremento del ángulo de talud en una
etapa temprana:
Estudio aplicado a la compañía minera Sierra Gorda SCM**

*Proyecto de Tesis presentado como parte de
la Actividad de Titulación para optar al
grado académico de Magíster en
Gestión Minera.*

Profesor Guía: Jorge Vidal.

**Ana M. Caprioglio
Jose Pizarro
Juan Zapata**

Antofagasta, Diciembre de 2014.

Contenido

RESUMEN	5
INTRODUCCION	7
MARCO TEÓRICO	10
1.1. Introducción al marco teórico	10
1.2. Geotecnia.....	10
1.3. El rol que juego la Geotecnia en la Minería Subterránea y Superficial	11
1.4. Caracterización de un Macizo Rocoso:.....	12
1.5. Ángulo Global.....	12
1.6. Estudio Geotécnico y Empresas Consultoras Expertas.....	13
2. METODOLOGIA	15
2.1. Formulación General.....	15
2.2. Identificación del Problema.	16
2.3. Objetivo general.	17
2.3.1. Objetivos específicos.	17
2.4. Tipo de Estudio.	18
2.5. Etapas de Investigación.....	18
3. ANALISIS Y DISCUSION (Desarrollo del Proyecto)	23
3.1. En qué situación se encuentran los Pit de mineras aledañas a Sierra Gorda.....	23
3.2. Estudio Geotécnico	27
3.2.1. Geología del Proyecto Sierra Gorda	28
3.2.2. Análisis a Escala Banco – Berma	29
3.2.3. Análisis a Escala Inter-rampa	33
3.2.4. Análisis por Equilibrio Límite a Escala Global año 2032	35
3.2.5. Análisis de Equilibrio Límite Rajo F1A	38
3.2.6. Análisis de Equilibrio Límite Rajo F5.....	39
3.2.7. Análisis del Modelamiento numérico con Flac	39
3.2.8. Recomendación de Ángulos Inter-rampa	40
3.2.9. Conclusiones del Estudio Geotécnico.....	41

3.3.	Diseño Técnico del Pit y las Fases	41
3.3.1.	Cálculo de nuevo Pit Optimo.....	41
3.3.2.	Diseño Operacional de Fases.....	44
3.3.3.	Comparación Operacional Pit Final.....	45
3.3.4.	Cubicación de Fases.....	49
3.4.	Evaluación No Económica del Plan Minero LOM	53
3.5.	Manejo del Cambio.....	57
3.5.1.	Evaluación de Riesgos	58
3.5.2.	Aprobación del Cambio.....	63
3.5.3.	Implementación del Cambio.....	65
3.5.4.	Monitoreo del Cambio.....	65
3.5.5.	Cierre del Cambio.....	65
4.	CONCLUSIONES	67
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	68

Ilustraciones

Ilustración 1.	Representación Gráfica de Angulo global	13
Ilustración 2.	Etapas de Desarrollo necesarias para obtener objetivos	21
Ilustración 3.	Proceso mensual para el cambio de ángulo de Talud en Minera Sierra Gorda SCM.....	22
Ilustración 4.	Distrito del Proyecto Sierra Gorda.....	24
Ilustración 5.	Mapa que muestra la intersección de la base de la zona de óxidos modelada (línea punteada) y la base de la zona de óxidos asumida (línea solida) del pit final 2032.	29
Ilustración 6.	Litología proyectada al Pit Final 2032.....	36
Ilustración 7.	Comparación Pit Óptimo, vista en planta.....	43
Ilustración 8.	Comparación Pit Óptimo, vista en sección.....	44
Ilustración 9.	Comparación de Diseños LOM 2014 vs LOM de Factibilidad.....	46
Ilustración 10.	Diseño Operacional, Comparación Fase 1 A.....	47
Ilustración 11.	Diseño Operacional, Comparación Fase 7 Final.....	48
Ilustración 12.	Razón Lastre / Mineral por Fases.....	50

Ilustración 13. Valorización Económica del Plan Minero LOM.	50
Ilustración 14. Proceso de Planificación LOM (Life of Mine) en Minera Sierra Gorda SCM.	51
Ilustración 15. Valorización Total del NPV.	53
Ilustración 16. Movimiento de Mineral más Lastre desde Mina acumulado por fases.	54
Ilustración 17. Aprobación por SERNAGEOMIN del aumento en el ángulo de Talud para Minera Sierra Gorda SCM.	65

Tablas

Tabla 1. Parámetros Diseño Pit.....	25
Tabla 2. Resumen del Benchmarking.	26
Tabla 3. Recomendaciones de Ángulos Inter-rampas (ISA)*	31
Tabla 4. Recomendaciones de Ángulos Inter-rampas (ISA)* usando pre corte**	31
Tabla 5. Recomendaciones de Ángulos Inter-rampas (ISA), bancos dobles usado pre corte*	32
Tabla 6. Resumen Análisis Estabilidad	37
Tabla 7. Resultados del Análisis Estabilidad F1A – perfil E4.....	39
Tabla 8. Comparación de Ángulo Global.	42
Tabla 9. Comparación de Ángulos de talud inter-rampa	45
Tabla 10. Cubicación de Fases, Razón Lastre / Mineral	49
Tabla 11. Comparación de datos de producción del Caso Base y Caso Actual.	53
Tabla 12. Impacto en los principales insumos producida por la Eficiencia.....	56

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es proponer una metodología para un caso de negocio en una compañía minera, elevando el ángulo de talud de las paredes del rajo, en una etapa temprana del proyecto.

Las empresas mineras siempre buscan mejorar la rentabilidad del negocio, y el aumento de los ángulos de taludes es una forma eficaz de hacerlo, en este ámbito, esta tesis muestra la novedad de evaluar este incremento en el primer año de operación del yacimiento minero, generando un beneficio importante en el negocio que recién comienza.

Para cuando se comenzó con este estudio “El proyecto minero de Sierra Gorda SCM”, se encontraba en la etapa de remoción de estéril para llegar a la exposición de mineral. El diseño de los bancos consideraba un ángulo de talud de 40° determinado en la etapa de pre factibilidad del proyecto, el cual podría ser conservador, es por ello que se genera como parte inicial de este proyecto de tesis la siguiente pregunta a resolver. ¿Cuáles son los factores a considerar para aumentar el ángulo de talud de manera técnica y económicamente segura?

En base a esto se comienza con la evaluación sobre la viabilidad de elevar el ángulo de talud, y el efecto económico que esto traería para el proyecto Sierra Gorda SCM, procurando a su vez identificar y evaluar los efectos secundarios.

La experiencia de los profesionales presentes en la compañía minera permitió visualizar la oportunidad que se tiene en este nuevo proyecto minero, dando paso a las gestiones necesarias para llevar a cabo un estudio técnico-económico que respalde este aumento de ángulo de taludes en las paredes del rajo, generando como respuesta los nuevos diseños del rajo en una etapa temprana.

Las herramientas técnicas que permiten este cambio son de conocimiento de la mayoría los ingenieros en minas, sin embargo, la oportunidad de la aplicación de dicho cambio y sus efectos económicos, va un poco más allá que tan solo el hecho de mover menor cantidad de material estéril, genera un sinnúmero de beneficios en las externalidades

con la reducción en el consumo de combustible, menor polución, menor consumo de neumáticos, entre otros beneficios que son de gran importancia en la industria minera.

Las conclusiones y los resultados obtenidos indican que es esta metodología de elevar los ángulos de taludes en una etapa temprana, es una buena práctica para rentabilizar el negocio de una compañía minera y se puede considerar como una eficiencia que impacta positivamente en el uso de insumos y suministros para los procesos asociados a la extracción del mineral.

INTRODUCCION

Durante años se ha observado que las malas decisiones en ámbitos relacionados con los diversos factores de estabilidad, como la calidad de roca, estructura geológica, presencia de agua, profundidad del rajo, entre otros, han afectado grandes proyectos mineros en el mundo. Por tal razón, Chile cuenta con un marco regulatorio general al que deben someterse todas las faenas de la Industria Extractiva Minera Nacional según el Decreto Supremo N° 72, de 1985, del Ministerio de Minería, modificado por el D.S. 132/2002. Hoy en día los proyectos de pre factibilidad y factibilidad, contemplan los recursos necesarios para realizar un buen estudio en el cual se pueda llegar a una condición de talud tanto segura, como económica, y que cumpla con la legislación, para eliminar o minimizar de esta forma consecuencias que podrían ser catastróficas tanto para el negocio minero como para las personas.

Para algunas empresas la premura por ganar algunos grados en ángulo global es lo principal, debido a que de esta forma se disminuye la cantidad material estéril a extraer, mejorando la razón estéril-mineral o stripping ratio como bien se conoce, lo que permite acceder a mejores leyes de mineral, reflejándose en los costos e inversiones del proyecto. Pero a veces dichos grados pueden generar significativas pérdidas a futuro, pérdidas asociadas a los riesgos geotécnicos, tales como deslizamientos, inflexibilidad en salidas de pit, entre otros. Por lo cual es primordial generar un buen estudio de la mecánica de rocas y la estabilidad ofrecida por este atractivo ángulo global.

Lo que no se ha considerado en la industria minera de forma oficial es cómo estos cambios, además de significar beneficios económicos para las empresas, tienen un gran efecto en la sustentabilidad y una gran repercusión en la cultura organizacional de las empresas cuando se le da el enfoque apropiado.

No es despreciable el menor consumo de combustible por las toneladas de material estéril que ya no es necesario transportar o mover desde el rajo, así como todos los insumos necesarios para ello (explosivos, lubricantes, repuestos, neumáticos, energía eléctrica, mano de obra, etc.) que tienen un impacto positivo en los pasivos industriales, en

la huella de carbón, y otros componentes importantes para generar una minería responsable y sustentable con el medio.

Por otro lado, el pensar en futuros resultados más eficientes desde etapas tempranas, etapa conocida con un concepto de factibilidad, se crea en cada uno de los trabajadores el concepto de “eficiencia”, “optimización”, “sustentabilidad” como el ADN de esta empresa, apoyo vital para llegar a conseguir cada uno de los resultados esperados.

El problema planteado en la Minera Sierra Gorda enmarcado en la gran interrogante, ¿Cuáles son los factores a considerar para aumentar el ángulo de talud de manera técnica y económicamente segura?, puede ser fácilmente adaptado a cualquier otro proyecto que se encuentre en una etapa similar y bajo ciertas semejanzas.

A su vez este estudio puede ser tomado como una guía de la cual muchas otras compañías mineras pueden aprender y/o mejorar la metodología de trabajo que se expondrá más adelante buscando conseguir o mejorar los resultados obtenidos, para lo cual es importante saber que el principal objetivo de esta tesis se basa en encontrar una oportunidad óptima para el aumento de ángulo de talud e inclinación de las paredes del rajo, pensado desde su etapa de temprana como el pre-stripping hacia el futuro desarrollo del pit.

Pero como abordar dicha problemática, para esto se ha desarrollado una metodología, en la cual se contempla el desarrollo de un marco teórico adecuado para el proyecto, un análisis de la condición actual de los taludes en Minera Sierra Gorda SCM, Se Identificó la estabilidad y situación de los ángulos actuales mediante un estudio geomecánico, se generó una propuesta de cambio de ángulo de talud valorada por los expertos, y se analizó bajo el diseño de las fases mineras y pit final cual sería el impacto posible usando los ángulos recomendados por expertos y consultores.

Una vez terminadas esas etapas, se pudo hacer una evaluación preliminar en la cual se identificaron y evaluaron posibles beneficios económicos y no económicos que aportaría este proyecto.

Esta tesis ira abordando las temáticas y ampliando un poco más los conceptos relevantes y etapas importantes dentro del proyecto, a través de su desarrollo observaremos diversas etapas como, el marco teórico que se considera adecuado para este proyecto, una metodología estudiada y aplicada en este proyecto, un profundo análisis y discusión de las temáticas encontradas durante la investigación y realización de esta tesis, por último se generara una serie de conclusiones como respuesta final a la interrogante y se dará a conocer si se cumplió con los objetivos y si los resultados fueron los esperados.

MARCO TEÓRICO

1.1. Introducción al marco teórico

El marco teórico que se planteara a continuación, permite conocer los conceptos mínimos necesarios para abordar cualquier problemática similar a la descrita en esta tesis.

Primero se partirá analizando cada uno de los conceptos más relevantes como la Geotecnia y su rol dentro de la minería tanto subterránea como de Superficie, servirá para comprender cuál ha sido la importancia durante la historia de la minería.

Posteriormente se describirán los análisis de un macizo rocoso y la definición de ángulo Global para comprender de manera más grafica como se compone este último y a que hace referencia dentro del estudio de tesis.

Por último se dará un enfoque más preciso en los estudios geotécnicos realizados para este proyecto y que empresas consultoras respaldaron cada una de las decisiones o respuestas generadas.

1.2. Geotecnia

La Geotecnia o Ingeniería Geotécnica se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la Tierra. Los ingenieros geotécnicos investigan el suelo y las rocas por debajo de la superficie para determinar sus propiedades y diseñar las cimentaciones para estructuras tales como edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, estabilizar taludes, construir túneles y carreteras, etc.

En general, las personas que trabajan en áreas de geotecnia tienden a pensar que la ingeniería de rocas es una disciplina moderna, pero es una ciencia que se remonta al año 1773, Coulomb (1776) describió el primer test realizado a un macizo rocoso en el año 1773

y su posterior presentación ante la Academia Francesa en Paris. Esto expresa claramente que los estudios en mecánica de rocas y su influencia geotécnica han estado presentes por muchos años.

Hoek y Bray (2009) Comentan que la geotecnia era identificaba como la mecánica de suelos; pero el término se amplió para incluir temas como la ingeniería sísmica, la elaboración de materiales geotécnicos, mejoramiento de las características del suelo, interacción suelo-estructura y entre otros.

1.3. El rol que juego la Geotecnia en la Minería Subterránea y Superficial

Uno de los campos de aplicación de la geotecnia se presenta en la minería tanto subterránea como de superficie, diversos estudios se han realizado a lo largo de la historia minera en los cuales cada vez más y más se observa cómo la tecnología hace parte importante en la aplicación de esta disciplina. En el caso de las minas a cielo abierto (Open Pit) juega un rol importante el hallazgo de un ángulo global de rajo, el cual permita minimizar la cantidad de estéril a extraer. Adicionalmente a la generación de un diseño óptimo, se hace indispensable considerar factores de seguridad asociados a la inestabilidad del ángulo global usado, balanceado con un eficiente movimiento de personal, equipos y material durante la operación minera (Wyllie, 2004).

Cada diseño de rajo es único, y a su vez aceptable dependiendo de las consideraciones realizadas bajo ciertas circunstancias del proyecto, los tipos de roca, parámetros de diseño, finalidad del diseño, entre otras. La responsabilidad del personal de geotecnia es encontrar una solución segura y económica, solución que deberá ser compatible con las restricciones aplicadas al proyecto (Hoek, 2007).

Un análisis completo de la estabilidad de ángulo global tanto en las etapas de pre factibilidad como factibilidad deben contemplar la investigación por banco, inter-rampa y a su vez ángulo global, esto permitirá determinar una estable optimización económica (Hadjigeorgiou, 2009).

1.4. Caracterización de un Macizo Rocoso:

Como bien se comentó anteriormente, cada caso de caracterización de macizos rocosos es único, por lo cual es difícil tener una metodología genérica, no obstante se podrían enumerar algunas fases importantes para desarrollar este tipo de análisis:

- Caracterizar el macizo rocoso a través de un análisis geológico y geotécnico.
- Identificar los potenciales mecanismos de deformaciones y fallas, como también el modelamiento de los mismos.
- Diseño de ángulo global con un posterior reforzamiento y monitoreo.

Con lo cual se podría tener una sencilla pero aplicable base para afrontar este tipo de temáticas (Fleurisson, 2012).

1.5. Ángulo Global

Al hacer referencia al ángulo global, se toma como referente el ángulo medido desde la primera a la última cresta del diseño de rajo, tal y como se ve en la Ilustración 1.

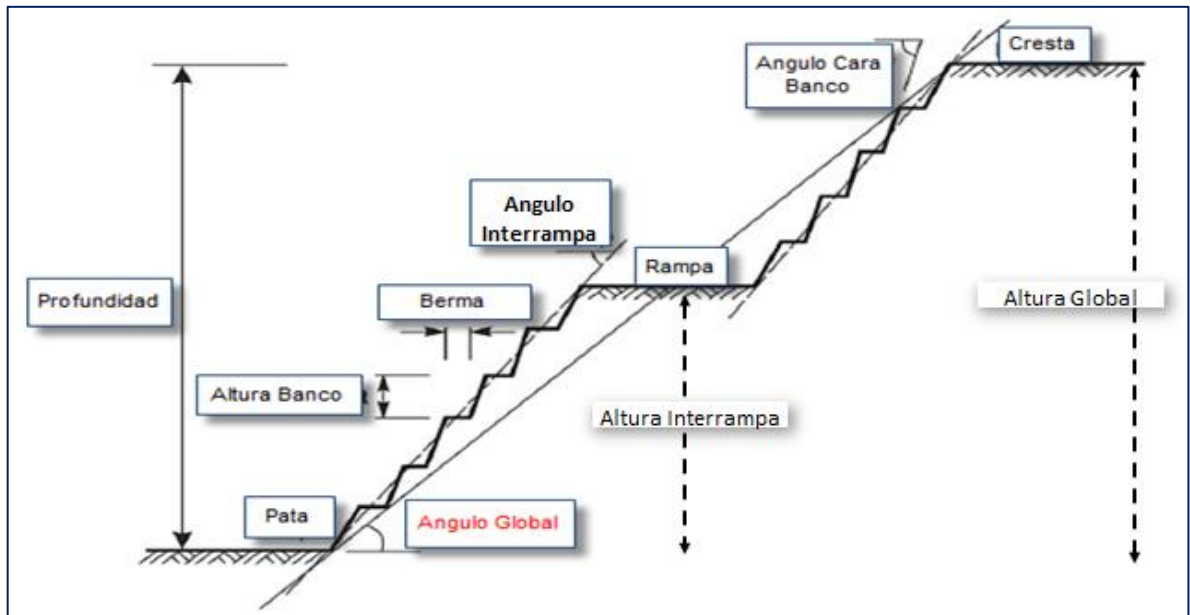


Ilustración 1. Representación Gráfica de Angulo global

Fuente: Rock Slope Engineering (2004).

1.6. Estudio Geotécnico y Empresas Consultoras Expertas

Los estudios geotécnicos forman una parte importante en la toma de decisión, más aun si se hablan de temas complejos como la decisión de aumentar un ángulo global, el cual sopesará el peso de las paredes del rajo por muchos años. Es por ello que estos estudios deben incluir la comprensión de aspectos litológicos, estructurales, alteraciones e hidrogeológicos, permitiendo que la masa de roca sea caracterizada geotécnicamente.

Empresas de consultoría expertas en estos temas, ya sean nacionales o extranjeras, son requeridas por empresas mineras para respaldar mediante cálculos y análisis técnico, proyectos como el aumento de ángulo global. Las empresas consultoras son requeridas dada su experticia en el tema y en especial aquellas que se encuentran en Chile tienen el conocimiento actualizado de las últimas técnicas o formatos requeridos por la autoridad SERNAGEIMIN en el último tiempo, de hecho la empresa elegida para llevar a cabo el estudio es AKL la cual tiene una constante comunicación con la autoridad dado que

realiza y tramita muchas peticiones geotécnicas para varias empresas mineras a lo largo de Chile.

2. METODOLOGIA

2.1. Formulación General.

El enfoque del proyecto se basa en encontrar una oportunidad óptima para el aumento de ángulo de talud e inclinación de las paredes del rajo, pensado desde su etapa de temprana como el pre-stripping hacia el futuro desarrollo del pit.

Dicha idea surgió a partir del juicio experto del grupo de ingeniería de la Minera Sierra Gorda SCM, junto con el trabajo de benchmarking enviado a realizar por la empresa AKL consultores. En el cual se buscaba conocer el ángulo global e inter-rampa usados en las faenas alledañas.

En la actualidad, la mayoría de las empresas mineras generan diversos cambios de inclinación de sus paredes de pit, logrando importantes ahorros económicos y no económicos para la misma empresa. Sin embargo son muy escasos los proyectos que se arriesgan a generar este tipo de cambio en una etapa temprana como lo es factibilidad.

Este sería el real desafío a afrontar en esta investigación, buscando a su vez el mejor equilibrio entre las ganancias económicas y los riesgos asociados a tener unas paredes de pit mucho más inclinadas, riesgos como, problemas de estabilidad, espacios de operación para equipos mucho más reducidos, complejidad en la interactividad de equipos en fondos de fases o mina, entre otros.

Adicionalmente, para el ente regulador en Minería Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), este tipo de cambios deben ser muy bien respaldados para optar a una aprobación de su parte, es por eso que esta investigación y proyecto a realizar, debe de ir soportado por estudios que sopesen la mejor de las alternativas.

2.2. Identificación del Problema.

Para todos los proyectos mineros una de las etapas más importantes es la definición del ángulo global, de tal forma que sea seguro para las personas y no presente riesgos al negocio.

Recientemente ocurrió uno de los casos más impactantes en la minería mundial, como fue, el deslizamiento en la mina “Bingham Canyon”, propiedad de Rio Tinto (11 de Abril de 2013). En este particular caso se evidenció la fuerza que tiene la tierra al mover 165 millones de toneladas sobre el pit”, dicho deslizamiento generó contables pérdidas económicas, como daños significativos a 13 palas, 14 camiones y algunos equipos menores. Adicionalmente, la empresa minera Rio Tinto reportó una reducción del 50 por ciento de la producción proyectada para el resto del año 2013 en dicha mina.

El proyecto minero de Sierra Gorda SCM, en su etapa de puesta en marcha, ha comenzado a explotar y a remover el estéril durante 2 años, antes de llegar a la exposición de mineral.

El diseño de los bancos que hoy se encuentran en explotación, considera un ángulo de talud de 40° determinado en la etapa de pre factibilidad del proyecto, el cual podría ser conservador de acuerdo a lo observado por el actual equipo de ingeniería de Sierra Gorda SCM, y dada la competencia de la roca vista en terreno tras dos años de pre stripping, por lo que podría existir una posibilidad de elevar el ángulo de talud, generando una mayor inclinación en las paredes del rajo y diversos beneficios económicos para el proyecto.

En base a estos antecedentes descritos en el párrafo anterior, se genera la pregunta a resolver.

¿Cuáles son los factores a considerar para aumentar el ángulo de talud de manera técnica y económicamente segura?

2.3. Objetivo general.

Evaluar la viabilidad de elevar el ángulo de talud, y el efecto económico que esto traería para el proyecto Sierra Gorda SCM, procurando a su vez que los efectos secundarios en aspectos de seguridad operacional se mantengan controlados.

2.3.1. Objetivos específicos.

El estudio debe dar respuesta en forma secuencial a los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un marco teórico adecuado, el cual permita describir los aspectos básicos asociados al estudio.
- Conocer los ángulos de talud usados en las faenas aledañas, realizando un benchmarking de la zona. Identificar el modelo de estabilidad y los ángulos de talud actuales del proyecto Sierra Gorda SCM, mediante un estudio geotécnico.
- Generar un estudio geotécnico que permita proponer un nuevo ángulo de talud para el proyecto.
- Generar un diseño técnico de las fases y el pit final, usando el nuevo ángulo de talud propuesto.
- Identificar y controlar los riesgos asociados a este cambio
- Identificar y evaluar los beneficios económicos que aportaría dicho cambio de ángulo de talud a la compañía.
- Identificar los beneficios no económicos que aportaría a su vez el cambio de ángulo de talud.

2.4. Tipo de Estudio.

El enfoque que se pretende dar a este estudio es cuali-cuantitativo ya que se utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y demostrar los beneficios planteados.

Las fuentes de información que se utilizan en este proyecto son de carácter mixtas, incluye fuentes tanto primarias, referentes a datos netamente de la mina y el proyecto, como fuentes secundarias, tales como datos e información que han sido extraídos de publicaciones o estudios realizados en otras faenas.

Las fuentes primarias de información que se usan son:

- Estudio de Factibilidad del Actual Proyecto
- Características Geotécnicas de la roca descubierta en la etapa de pre-stripping.
- Estudio geotécnico para el diseño de ángulo de talud realizado por la empresa Call & Nicholas, Inc.
- Resultados de las simulaciones y trabajos realizados por el equipo de ingeniería mina.

2.5. Etapas de Investigación

Las etapas que se desarrollan para lograr los objetivos planteados en el proyecto se describen a continuación:

- Para identificar la posibilidad de subir el ángulo de talud, se analiza mediante juicio experto de profesionales de Sierra Gorda, si la relación entre la calidad de rocas y taludes actuales tendría alguna opción de mejora.

- Se contrata una empresa consultora, la cual se encarga de generar un benchmarking de los ángulos de talud usados actualmente en las minas aledañas al proyecto Sierra Gorda.
- Una vez definida la posibilidad de aumentar el ángulo de talud, se desarrolla un diseño de pit final preliminar con un ángulo de talud aproximado al promedio demostrado en el benchmarking.
- Se calculan los beneficios económicos preliminares en el cual se busca evidenciar las ventajas de mover menos material estéril y aumentar la cantidad de mineral. Basado en el cambio geométrico del pit.
- De los resultados obtenidos en el cálculo preliminar, que resultan ser atractivos para la compañía, se contrata una empresa consultora especializada en geotecnia, la cual se encarga de analizar el estado actual del proyecto en ámbitos geotécnicos y a su vez generar una propuesta formal del diseño geotécnico del nuevo ángulo de talud. Se genera el nuevo diseño del pit final y cada una de las fases de pit, incluyendo el nuevo ángulo de talud indicado por la empresa especializada en geotecnia. Esto se desarrolla con el apoyo del software MineSight, en esta etapa se calculan las reservas posibles a extraer del nuevo pit óptimo, el diseño de las fases operativas de extracción de mineral, la cubicación de las reservas reales del rajo final y con la ayuda del software COMET se generan los planes mineros.
- Se valoriza el beneficio económico real, llevando las nuevas fases con el nuevo ángulo de talud a un plan minero a la totalidad de la vida de la mina “Plan LOM” (Life of Mine). Evaluando este plan con el valor en el tiempo, primero calculando los flujos por periodos y luego actualizándolos con una tasa de descuento del 8%, para obtener finalmente el VAN de cada plan minero.

- Se comparan los VAN del plan original vs el plan minero actual usando el nuevo ángulo de talud y se calcula el porcentaje de variación entre estos escenarios.
- Se analizan los riesgos de los cambios que se introducirán debido a esta nueva condición. Esto se realiza mediante juicio experto, en donde se identifican los riesgos, las medidas de control, planes de mitigación y los instrumentos de monitoreo extras que se debieran adquirir para asegurar el control de los eventuales deslizamientos de los taludes y otros posibles riesgos.
- Se identifican los beneficios no económicos que podría aportar este cambio, asociados a un menor impacto ambiental, entre otros.
- Se realiza la tramitación necesaria para obtener la aprobación de este cambio ante la entidad reguladora del gobierno, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Finalmente, se ejecuta el cambio del ángulo de talud por parte de operaciones mina según los planes mineros desarrollados en los puntos anteriores.

A continuación, se presenta la Ilustración 2 que contiene las etapas a desarrollar para lograr los objetivos planteados.

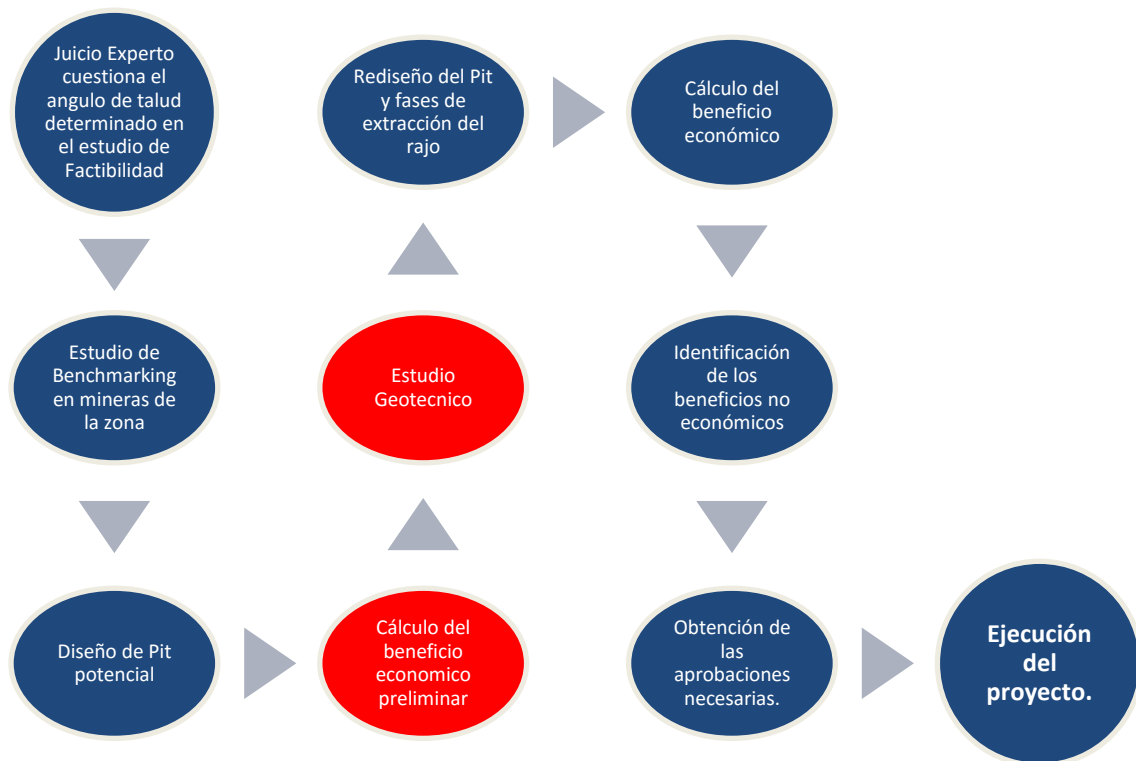


Ilustración 2. Etapas de Desarrollo necesarias para obtener objetivos

Fuente: Elaboración propia.

De todas las etapas indicadas en la ilustración anterior, aquellas que son claves en el proceso para llevar a cabo el estudio son las etapas:

- Estudio Geotécnico
- y el Cálculo del Beneficio Económico del proyecto.

Por otro lado es necesario considerar las siguientes actividades y precedencias en el Proceso para el Cambio de Ángulo de Talud en Sierra Gorda SCM, ver siguiente flujograma:

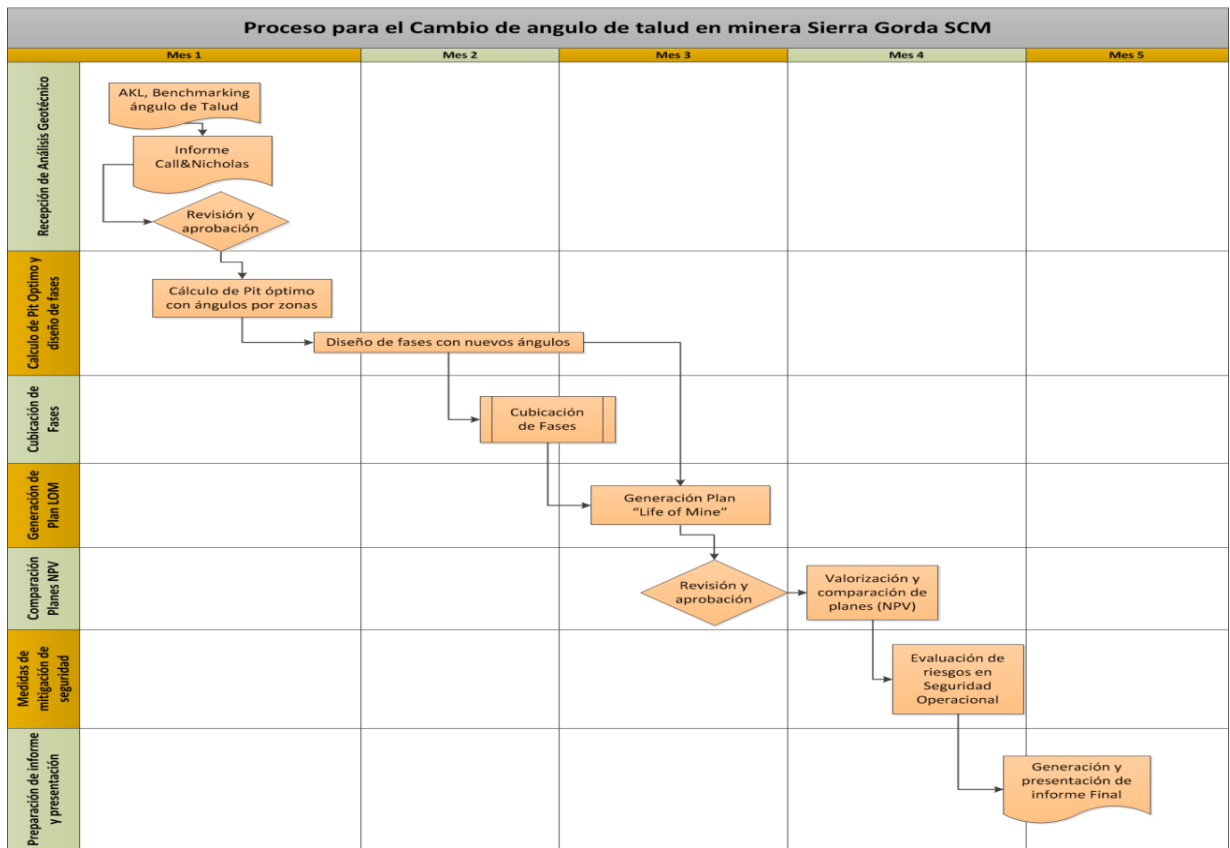


Ilustración 3. Proceso mensual para el cambio de ángulo de Talud en Minera Sierra Gorda SCM.

Fuente: elaboración propia.

3. ANALISIS Y DISCUSION (Desarrollo del Proyecto)

Para este informe desarrollaremos los puntos siguiendo un orden asociado a temas y que, por lo general, coinciden con la cronología de los eventos.

Partiremos con una reseña a las mineras cercanas a Sierra Gorda que permitieron dar el punto de partida para análisis y estudios de mayor envergadura, para luego seguir con los estudios geotécnicos para el diseño del rajo para el año 2032, a cargo de la empresa consultora internacional Call & Nicholas, ICN (C&N). La recomendación de ángulos descrita en este informe se basa fundamentalmente en el análisis de bancos, análisis de inter-rampas y análisis de taludes.

Luego, se realizó el diseño de taludes para el rajo, en su etapa de ingeniería de factibilidad, para ser presentado a Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), con la finalidad de obtener los permisos considerados para la explotación a cielo abierto del rajo del proyecto Sierra Gorda. Los estudios fueron realizados por AKL Ingeniería y Geomecánica Ltda. (AKL) y tienen como base fundamental, el estudio realizado por la empresa C&N.

Por último, se realizaron los respectivos análisis económicos y no económicos que se generan con este cambio en el proyecto.

3.1. En qué situación se encuentran los Pit de mineras aledañas a Sierra Gorda

Como primer análisis realizado, para tener más información que respalde la idea de aumentar el ángulo de talud, se pensó en conocer la situación de mineras que tuvieran condiciones geológicas similares, para compararlas con la de Minera Sierra Gorda. Es por ello que se solicitó a AKL Consultores, realizar un benchmarking de los ángulos de talud de mineras que tuvieran condiciones similares a la Minera Sierra Gorda.



Ilustración 4. Distrito del Proyecto Sierra Gorda.

Fuente: Restorcelli and Ronning, 2005.

En el estudio se incluyó a Radomiro Tomic, Chuquicamata, Escondida, Pelambres, Spence, Zaldívar y otras mineras más que pertenecen a la zona y que evidencian buenas prácticas en el diseño de Mina.

Los parámetros originales de Diseño del Pit en la etapa de Factibilidad del Proyecto Sierra Gorda son los que se describen en la Tabla 1.

Pit Design Sector	Bench Configurations		Inter-ramp Slope Configurations		Overall Slope Configurations	
	Bench Face Angle	Bench Width	Inter-ramp Angle	Max. Slope Height	Overall Slope Angle	Total Slope Height
	(°)	(m)	(°)	(m)	(°)	(m)
Broken & Transition Zone	60	10	40	120	36 to 40	100 to 250
North, East, and South(East sub-sector)	65	8.5	45	300	40	900 to 950
West and South(West sub-sector)	60	10	40	300	38	850
Ramp Width		38 m				
Maximum Ramp Grade		10%				
Minimum Mining Width		100 m				

Tabla 1. Parámetros Diseño Pit.

Fuente: Informe Factibilidad Proyecto Sierra Gorda, mayo 2011.

La decisión de realizar estos estudios con la empresa AKL se debe a dos razones, primero que el foco de las unidades del Proyecto Sierra Gorda es la producción de cobre y por otro lado, no existe en la compañía expertos para este tipo de estudio. Por lo tanto, para garantizar los resultados se concluyó que lo más óptimo es externalizar este servicio.

El resumen del informe se presenta en la Tabla 2, donde se aprecia que la tendencia, en la zona, sobre el ángulo inter-rampa es superior a 40 grados, sin poner sin riesgo la estructura del rajo.

Mina	Sector	Altura Banco	Ancho Rampa	Angulo Interrampa	Angulo Global	Altura Global
Radomito Tomic, Codelco. 2006	Este	15-30	30	35-58		200-500
	Oeste			45-58		
Chuquicamata, Codelco. 2006	Este	32	30	50-55		900-1000
	Oeste		40	30-55		
Escondida. 2008	Varios	15	40	34-50	29-41	700-800
Proyecto Spence, CMRC. 1998	Varios	30	30	53	<47	350
Escondida Norte, Fase I. 2006	Oeste	30	30	50	41-51	330
	Noreste			45		
	Sureste			49		
Rajo Ujina, CMDIC. 2000	Noroeste	15	35	55-59	40-43	375
	Varios			59		
Rajo Rosario, Fase II, CMDIC. 2004	Suroeste	15	35	50	29-45	350
Rajo Coipa Norte, Fase 5 MDO. 2001	Oeste	20	25-30	48		415
	Varios			54		
Rajo La Union, Division Andina. Codelco, 2000	Varios	30	35	53		300-400
Rajo Sur-Sur, Rajo Actual Division Andina. Codelco, 2000	Morrena	30	40	29		250-320
	Varios		35	57		
Los Pelambres. 2006	Varios	30	30	52-53	46-48	400-500
Rajo Zaldivar, CMZ. 2005	3	30	30	46		450
	4			53		
	5					
	6			45		
Rajo MatoVerde, Pared Este. 2005	Varios	20	30	53-60	45-62	230

Tabla 2. Resumen del Benchmarking.

Fuente: AKL Consultores.

Al comparar la situación de Sierra Gorda de sus ángulos de talud inter-rampa (tabla 1), con los ángulos expuestos en el benchmarking (tabla 2), el equipo de profesionales de Sierra Gorda de forma unánime llegó a la conclusión que existe una gran oportunidad para que el ángulo global del Pit de Sierra Gorda sea superior al que se identificó en el informe de Factibilidad.

Para tomar la decisión de forma consciente con la seguridad y estabilidad del rajo se consideró necesario realizar un estudio geotécnico, el cual es explicado a continuación.

3.2. Estudio Geotécnico

Basados en los conocimientos previos de los ingenieros de Minera Sierra Gorda, tanto lo observado en campo por los mismos, y los resultados entregados por AKL Consultores, se generaron discusiones técnicas entre los profesionales de SGSCM para analizar las oportunidades que se presenta el aumento del ángulo global en una etapa temprana como la factibilidad, y dar viabilidad a este proyecto de aumento.

El resultado preliminar de los profesionales daba serios indicios del gran potencial y la alta competencia de las rocas emplazadas en el macizo rocoso de SGSCM, las cuales mostraban en labores subterráneas antiguas gran dureza en sus paredes a pesar de los años de explotación y abandono de estas labores subterráneas.

La elevación de los ángulos de talud como oportunidad debía ser soportada por un informe técnico de alta calidad y analizada por profesionales expertos en las ramas de la Geotecnia, es por ello que se decide contratar a la empresa Call & Nicholas para liderar la investigación y validar un posible cambio de ángulo de talud.

Entonces la empresa consultora Call & Nicholas a solicitud de Sierra Gorda SCM realiza un estudio geotécnico que incluye las recomendaciones para el diseño del rajo, considerando un incremento en el ángulo de talud. La información usada en los análisis incluyó sondajes geotécnicos orientados, mapeo de celdas, información geomecánica de sondajes, ensayos de resistencia de laboratorio y finalmente el modelo geológico 3D del macizo rocoso y el modelo de fallas geológicas mayores, ambos proporcionado por SGSCM.

Para cumplir con los requerimientos de SERNAGEOMIN se incluyó en el análisis lo siguiente:

- Con el fin de validar el uso del criterio Ritchie Modificado para la definición del ancho mínimo de contención de bancos, se realizó un análisis de caída de roca. Adicionalmente, se realiza un contraste entre discusiones típicas del análisis cinemático de estabilidad de bancos y la estimación de la distribución de *backbreak* basado en la longitud, orientación, resistencia y espaciamiento de las diaclasas mapeadas de C&N.

- Para estimar las probabilidades de un afloramiento de planos de corte y la geometría de cuñas en el ángulo inter-rampa se revisó un análisis cinemático. Este tipo de análisis fue contrastado con el análisis probabilístico de C&N, el cual expone las longitudes, espaciamientos, resistencia y orientaciones de las fallas estructurales con el fin de estimar el volumen de la falla en el ángulo inter-rampa.

- Se realizó un análisis global para el diseño final del año 2032 del rajo Catabela, utilizando un ángulo de inter-rampa de 45° en la zona de óxidos y un ángulo de 50° en la zona primaria. En general, los ángulos globales asociados a esta recomendación de ángulos inter-rampa varían en el rango de 42° a 44°. Estos análisis fueron actualizados para incluir el método Hoek-Brown para la estimación de la resistencia del macizo rocoso, carga pseudoestática y resistencia anisotrópica a lo largo de los planos de fallas modelados.

- Además fueron evaluados respecto de su estabilidad dos rajos intermedios, incluyendo los diseños de las fases a un año de explotación (F1A) y otro a 10 años (F5).

3.2.1. Geología del Proyecto Sierra Gorda

El depósito de Sierra Gorda está cubierto por un material erosionado y fracturado denominado como “zona de óxidos”. Esta zona fue modelada por geólogos de SGSCM, para propósitos de modelamiento geotécnico, se asume que la base de la zona de óxidos se encuentra a una elevación de 1532 m.s.n.m. Las fundaciones litológicas sobre esta elevación comprometen el diseño del sector 9. La Ilustración 5, muestra la intersección de la base de la zona de óxidos modelada (línea punteada) y la base de la zona de óxidos asumida (línea sólida) del pit final 2032.

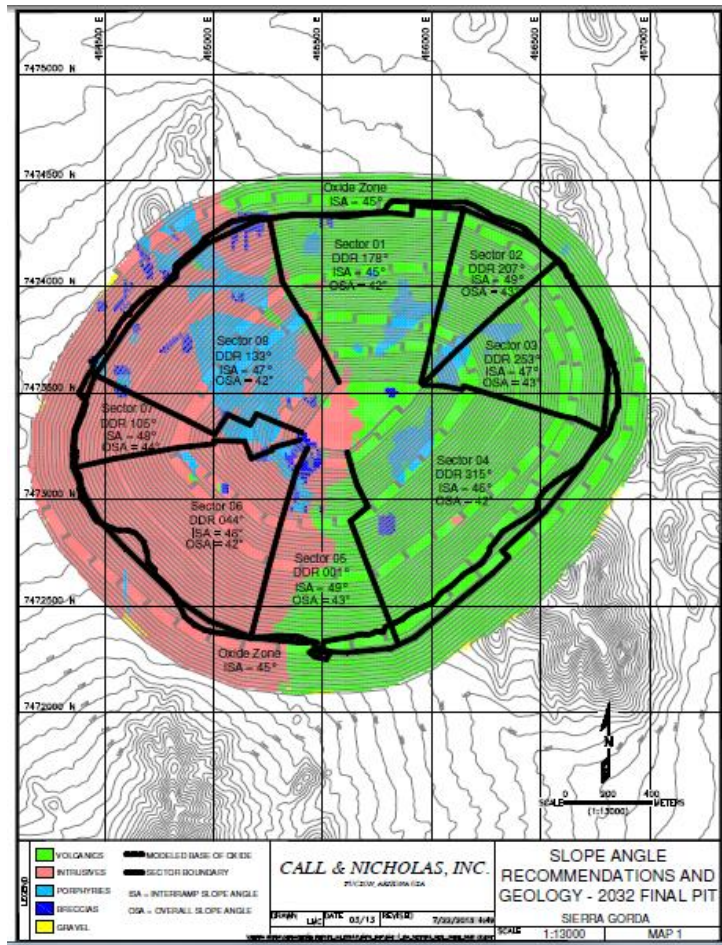


Ilustración 5. Mapa que muestra la intersección de la base de la zona de óxidos modelada (línea punteada) y la base de la zona de óxidos asumida (línea sólida) del pit final 2032.

Fuente: Call&Nichollas (2013).

3.2.2. Análisis a Escala Banco – Berma

El propósito del análisis banco berma es determinar el ángulo global más inclinado que puede ser excavado manteniendo un ancho de berma adecuado por motivos de seguridad. Es un análisis probabilístico que calcula la confiabilidad de mantener un ancho de banco mínimo de contención de material proveniente de la caída de roca. El análisis utiliza información del *rock fabric* de los sondajes orientados, mapeo de celdas y ensayos de laboratorio de resistencia de falla al corte. El análisis banco - berma utiliza el programa

Backbreak de C&N para generar la tabla de ángulos globales, ángulos cara de banco promedio y porcentajes de contención.

C&N utiliza un enfoque probabilístico para determinar la distribución de los ángulo cara de banco para una pared específica en el rajo. La distribución de los ángulos cara de banco está relacionada con la cantidad de *backbreak* que ocurre tras la cresta del banco diseñado. El *Backbreak* es una función de la longitud, espaciamiento, orientación y resistencia al corte de las estructuras que afloran en la cara del banco. Los procesos de tronadura también impactan en el *backbreak*. Controlar la tronadura permitirá la construcción de ángulos cara de bancos más empinados y bermas de contención más anchas.

Debido a la variabilidad de los parámetros geológicos, métodos probabilísticos deben ser utilizados en el análisis banco - berma. La probabilidad de inestabilidad para estructuras específicas se compone de tres partes: 1) probabilidad de que exista una estructura en orientación adversa, 2) probabilidad de que la estructura sea lo suficientemente extensa y aflore, 3) probabilidad de deslizamiento a lo largo de la estructura. La probabilidad de inestabilidad para una estructura geológica en particular es producto de estas tres probabilidades por separado.

Las tablas 3 hasta la tabla 5, muestran los ángulos inter-rampa, configuraciones de bancos y anchos de berma recomendados para los sectores definidos en el análisis. Los sectores usados en el análisis banco - berma proyectados al rajo Catabela 2032 se mostraron en la Ilustración 5 de la sección anterior.

Tipo de Roca	Sector de Diseño	Slope Dip Direction	Altura de Banco (m)	ISA (degrees)	Design BFA (degrees)	Design Average BW (m)	Reliability (%)
Volcanics	01	178°	16	45°	70°	10,2	80
	02	207°	16	49°	77°	10,2	83
	03	253°	16	47°	72°	9,7	82
	04	315°	16	46°	72°	10,3	84
	05	001°	16	49°	77°	10,2	81
Intrusives	06	044°	16	48°	74°	9,8	80
	07	105°	16	48°	74°	9,8	80
	08	133°	16	47°	72°	9,7	80
Oxide	-	000°-359°	-	45°	70°	10,2	-

*ISA Recomendaciones para bancos simples de 16 m de altura usando tipicamente trondura controlada.

Tabla 3. Recomendaciones de Ángulos Inter-rampas (ISA)*

Fuente: Call&Nicholas (2013).

Tipo de Roca	Sector de Diseño	Slope Dip Direction	Altura de Banco (m)	ISA (degrees)	Design BFA (degrees)	Design Average BW (m)	Reliability (%)
Volcanics	01	178°	16	50°	77°	9,7	-
	02	207°	16	50°	77°	9,7	-
	03	253°	16	50°	77°	9,7	-
	04	315°	16	50°	77°	9,7	-
	05	001°	16	50°	77°	9,7	-
Intrusives	06	044°	16	50°	77°	9,7	-
	07	105°	16	50°	77°	9,7	-
	08	133°	16	50°	77°	9,7	-
Oxide*	-	-	-	-	-	-	-

*ISA en zona de oxidos usar Tabla 8a
**ISA para bancos simples de 16 m de altura usar pre corte y tronadura controlada.

Tabla 4. Recomendaciones de Ángulos Inter-rampas (ISA)* usando pre corte**

Fuente: Call&Nicholas (2013).

Tipo de Roca	Sector de Diseño	Slope Dip Direction	Altura de Banco (m)	ISA (degrees)	Design BFA (degrees)	Design Average BW (m)	Reliability (%)
Volcanics	01	178°	32	50°	73°	17,0	+ 90
	02	207°	32	50°	73°	17,0	+ 90
	03	253°	32	50°	73°	17,0	+ 90
	04	315°	32	50°	73°	17,0	+ 90
	05	001°	32	50°	73°	17,0	+ 90
Intrusives	06	044°	32	50°	73°	17,0	+ 90
	07	105°	32	50°	73°	17,0	+ 90
	08	133°	32	50°	73°	17,0	+ 90
Oxide*	-	-	-	-	-	-	-

*ISA en zona de oxidos usar Tabla 8a
**ISA para bancos dobles de 32 m de altura usar pre corte y tronadura controlada.

Tabla 5. Recomendaciones de Ángulos Inter-rampas (ISA), bancos dobles usado pre corte*

Fuente: Call&Nicholas (2013).

Tabla 3 muestra el caso base para la recomendación de ángulos inter-rampa. El material más cercano a la superficie se compone de una capa débil de material óxido, el cual requerirá de ángulos más bajos. Se recomienda un IRA de 45° para estas áreas. Es probable que esta medida se deba mantener hasta que se logre una elevación de 1532 metros y más unidades empiecen a surgir. Bajo la zona de óxido, el resto del rajo es separado por límites geológicos y orientaciones de las paredes. Se identificaron ocho sectores con dos dominios geológicos: unidades volcánicas (DDR 178° a 001°) y unidades intrusivas (DDR 044° a 133°): Los IRA recomendados para volcánicos varían entre 45° y 49°. Las unidades intrusivas son menos variables, con IRA recomendado entre 47° y 48°. Las fases intermedias en Sierra Gorda no deben exceder los IRA recomendados de la Tabla 3.

Las Tablas 4 y 5 muestran los potenciales ángulo inter-rampa para los taludes finales del rajo. La Tabla 4 corresponde a IRA en bancos simples considerando control de tronadura como requisito (incluye pre-cortes, tiros cortos, y limpieza adecuada de bancos).

La Tabla 5 muestra potenciales IRA para bancos dobles, en donde también se requiere de tronadura controlada para alcanzar estos ángulos. Buenas prácticas de limpieza

serán requeridas para remover desde la cresta y de la cara de los bancos los materiales sueltos. Sobre todo en la primera parte del banco doble.

3.2.3. Análisis a Escala Inter-rampa

El análisis a escala inter-rampa estima la cantidad y el volumen de fallas producidas debido al afloramiento de estructuras geológicas en la roca. Para que estas fallas ocurran, las estructuras discretas que forman la geometría de la falla deben aflorar en el talud como plano de falla o cuña, y las fuerzas resistentes deben ser menores a las fuerzas actuantes sobre el bloque.

En minería a cielo abierto, el ángulo en el talud óptimo ocurre cuando el beneficio incremental de reducir la razón de *stripping* iguala el costo asociado a las fallas de los taludes. Estos costos incluyen los costos de limpieza, desplazamiento del mineral, reservas de mineral y monitoreo de taludes. Si ocurren fallas pequeñas, puede que se haya realizado mucho stripping, sin embargo, si ocurre una falla grande, se pierde mineral y los costos superan el costo óptimo. Los taludes óptimos por lo general sufren algún tipo de inestabilidad.

C&N uso programas internos para estimar el volumen de las fallas de ángulos inter-rampa. Nuevamente, la orientación y longitud de los sistemas estructuras son los parámetros más importantes en la determinación de una falla en el talud. Esta técnica se describe en la siguiente sección de este capítulo.

El análisis cinemático evalúa las orientaciones de intersecciones de cuña o planos que afloran en alguna pared en particular, sin considerar la longitud de las estructuras. Una acumulación de estas fallas son graficadas y se evalúa un rango de fallas aceptables. Sin la evaluación de la longitud de las estructuras, este tipo de análisis tiene un uso limitado en la toma de decisiones relacionadas con el IRA óptimo.

Se realizaron análisis de estabilidad en 32 metros de incremento en fallas que podrían formar deslizamientos planos para alturas que van desde los 32 metros (bancos

dobles) hasta la altura máxima del talud en cada sector. Se asumió que la falla por deslizamientos planos es posible para estructuras con direcciones de manto entre $\pm 30^\circ$ de la dirección de manto de la pared final.

Ángulos inter-rampa que van entre los 28° y los 58° fueron analizados. Todas las fallas que producían deslizamientos planos que afloraban, fueron evaluadas. El análisis primero determinó la probabilidad de falla, el número de fallas y el tonelaje de las fallas para cada incremento de 32 metros para cada una de las fallas localizadas dentro del plano. Un número compuesto de fallas esperadas y tonelajes esperados se determinó para cada sector mediante la adición de los resultados de incrementos individuales de 32 metros.

También se realizaron análisis con 32 metros de incremento en las geometrías de cuñas para alturas entre 32 metros y la altura máxima del talud. El análisis evaluó la estabilidad de cada combinación (de la falla a la derecha y de la falla a la izquierda). Los resultados fueron compuestos, definiendo los volúmenes y cantidad de fallas esperados.

La cantidad total esperada de fallas discretas y tonelaje de falla para cada sector fue calculada mediante la adición de los volúmenes de cuñas y deslizamientos planos. Tonelajes compuestos y cantidad de fallas son mostrados gráficamente versus los ángulos de los taludes, para cada sector analizado.

Como se dijo anteriormente, los taludes de fases intermedias y finales del rajo fueron examinados visualmente en relación a modelos de falla actuales para buscar intersecciones de cuña o deslizamientos planos que afloren en las paredes. Ningún plano o intersección de cuña aflorará en el diseño final 2032. Sin embargo, se realizó el análisis inter-rampa usando toda la base de datos de fallas incluyendo orientaciones obtenidas de los mapeos. En este punto, se debe suponer que las fallas intermedias pueden existir en todos los sectores, y que estas estructuras imitarán la orientación de las fallas modeladas.

Los análisis se realizaron bajo condiciones estáticas secas, anticipando el programa de drenado desarrollado en las paredes del rajo.

Se realizaron análisis inter-rampa para las porciones superiores de cuatro de los sectores del diseño 2032 que tienen los taludes con mayores alturas y mayores anchos. El tonelaje de falla esperado y número de fallas se mantienen bajos en los Sectores 01 y 04, con ángulos inter-rampa de hasta 50°. En el Sector 06, se esperan fallas de hasta más de 100.000 toneladas con un ángulo de 50°. En el Sector 08, se esperan fallas de más de 800.000 toneladas con un ángulo de 50°. Estos análisis definen a los sectores 06 y 08 como los sectores con potenciales fallas inter-rampa que podrían impactar hasta 4 bancos dobles. Mapeos de mucha precisión serán requeridos para identificar los sets de fallas y distribuciones de longitudes de estas fallas en dichos sectores. Si se identifican grandes cuñas, se tendrá que modificar el plan de operaciones de fases intermedias para evitar que ellas afloren.

La presencia de la Falla Shoulder en la cuña izquierda del set estructural en el sector 06 cuenta con una gran porción del volumen de falla calculado. La Falla Shoulder no intercepta con el Sector 08 en el pit final 2032, por lo que considerarla como una falla que puede causar fallas en el sector es una suposición conservadora. Removiendo la Falla Shoulder de la base de datos reduce el volumen esperado de falla a 300.000 toneladas para un ángulo de 50°. La cantidad de fallas esperadas es de 36, por lo que una falla promedio correspondería a 8.000 toneladas. Sin embargo, debido a la naturaleza estadística de las orientaciones, espaciamiento y longitud de las estructuras geológicas, existe una pequeña probabilidad de que todas las toneladas de falla esperadas se liberen en un solo evento.

Estructuras intermedias, tienen por lo general, más de una distribución basado en el manto de las mismas. En muchas propiedades, las estructuras más largas tienden a tener un manto más inclinado, mientras que estructuras más planas no tienden a ser muy extensas. Una situación como esta puede mejorar las perspectivas de los sectores 06 y 08 discutidas anteriormente.

3.2.4. Análisis por Equilibrio Límite a Escala Global año 2032

Para el análisis de estabilidad del rajo Catabela, año EOY 2032, se consideraron tres secciones del diseño dado. La Ilustración 6, muestra las ubicaciones de las tres secciones analizadas. Los resultados de dicho análisis se resumen en la Tabla 6.

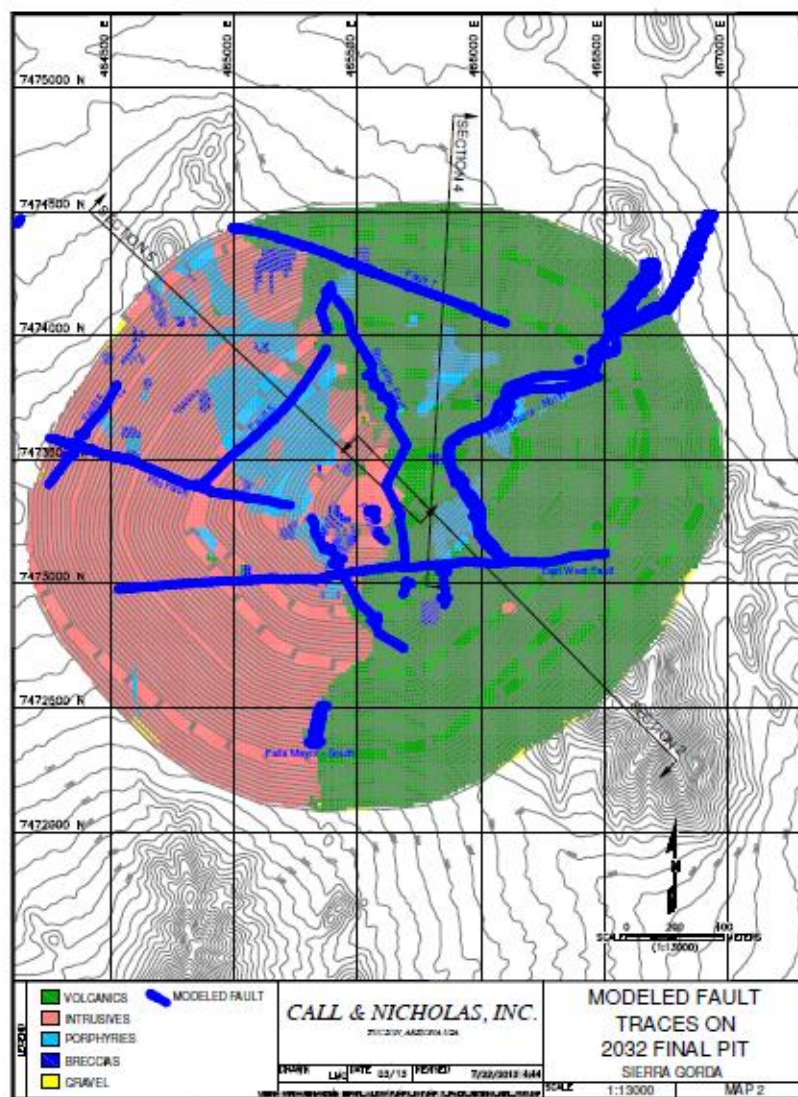


Ilustración 6. Litología proyectada al Pit Final 2032.

Fuente: Call&Nicholas (2013)

Perfil	Rock Mass Strength Method	Slope Dip Direction (degrees)	Overall Slope Height (meters)	Interramp Slope Angle (degrees) *	Horizontal Pseudostatic Load (g)	Piezometric Elevation (meters)	Horizontal Drainage from Slope Face (meters)	FOS	Probability of Failure
2	C&N Mean	315	900	50	0,00	Dry	Dry	1,79	0,00
					0,00	1603,0	10,0	1,27	0,12
					0,15	1603,0	10,0	1,01	0,48
					0,00	1603,0	150,0	1,51	0,03
					0,15	1603,0	150,0	1,20	0,18
4	C&N Mean	178	800	50	0,00	Dry	Dry	2,43	0,00
					0,00	1603,0	10,0	1,84	0,02
					0,15	1603,0	10,0	1,49	0,07
					0,00	1603,0	150,0	1,98	0,01
					0,15	1603,0	150,0	1,64	0,05
5	C&N Mean	133	830	50	0,00	Dry	Dry	2,69	0,00
					0,00	1603,0	10,0	2,13	0,01
					0,15	1603,0	10,0	1,71	0,02
					0,00	1603,0	150,0	2,30	0,00
					0,15	1603,0	150,0	1,82	0,00

Tabla 6. Resumen Análisis Estabilidad

Fuente: Call&Nicholas (2013)

Los análisis se corrieron en condición seca, sin presión de poros o nivel freático en el talud. Se consideró un nivel freático con una elevación de 1603 metros para el análisis en condiciones saturadas para todas las secciones. Las corridas saturadas del análisis fueron completadas asumiendo una condición no drenada (nivel freático ubicado bajo 10 metros del talud) y condición drenada a 150 metros bajo la superficie del talud.

Todas la secciones analizadas obtuvieron un factor de seguridad mayor a 1.50 usando las condiciones de resistencia dadas por C&N y ángulos inter-rampa hasta 50°, con taludes drenados 150 metros bajo la superficie y condiciones estáticas de carga. También se realizaron análisis bajo condiciones pseudoestáticas con un coeficiente sísmico horizontal equivalente a 0.15g. Bajo condición pseudoestática, los factores de seguridad superaron 1.00, sin embargo, la probabilidad de falla para Sección 2 en condición saturada fue de 0.48, mientras que, en condición drenada, el factor de seguridad aumentó a 1.20, con una probabilidad de falla de 0.18. La Sección 2 es la más crítica y la que requiere drenaje para mantener su estabilidad.

Las resistencias anisotrópicas asociadas al *rock fabric* fueron evaluadas para las Secciones 2 y 5. Basado en la naturaleza fragmentada de la roca y el amplio espaciamiento entre joints, la orientación crítica de la falla anisotrópica cruzará importantes áreas de roca

intacta. La resistencia anisotrópica calculada para estas secciones fue mayor a las fuerzas estimadas usando los métodos C&N y Hoek –Brown.

La Falla Mayor está ubicada detrás de la pared a 300 metros bajo el rajo 2032 en la Sección 2. Una falla que atravesase esta Falla y el macizo rocoso frente a ella fue evaluada por ambos métodos. Para el caso drenado a 150 metros, se obtuvo un factor de seguridad de 1.57 para método C&N, y 1.38 para metodología Hoek-Brown. Nuevamente, el método Hoek-Brown arrojó factores de seguridad menores debido a que esta falla no impacta la altura total del talud. Para esta altura parcial, las tensiones de confinamiento son bajas, el cual corresponde al rango en donde las fuerzas Hoek-Brown son menores que las de C&N.

Se recomienda a Minera Sierra Gorda drenar los taludes hasta 150 metros tras la pared de los mismos en cada uno de los sectores con el fin de reducir la presión de poros en las fallas.

3.2.5. Análisis de Equilibrio Límite Rajo F1A

El Rajo F1A corresponde a un rajo intermedio del diseño, construido en los primeros años de proyecto (a mediados del año 2014). La Falla Mayor modelada se localiza en la pared este de la topografía del rajo. La sección crítica de análisis evalúa el *buttress* de macizo rocoso entre la Falla Mayor y la pata del rajo F1A, cuyos resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7. Los factores de seguridad obtenidos superan 2.50 para los promedios de fuerza estimados de C&N y Hoek-Brown, por lo que no se anticipa una falla en el sector. La altura total del talud en el presente rajo oscila entre los 250 y 300 metros.

Tabla 12: 2013 SlopeW Overall Stability Analysis Summary Pit F1A - Perfil E4 Altura del Talud, 263m., ISA=50°, Slope DDR 290°							
Perfil	Strength Method	Seismic Load (g)	Piezometric Elevation	Horizontal Drain (m)	Anisotropy	FOS Mean	Probability of Failure
E4	C&N	0,00	1603,0	10,0	Fault	2,99	0,00
E4	C&N	0,00	1603,0	100,0	Fault	3,24	0,00
E4	H&B	0,00	1603,0	10,0	Fault	2,50	0,00

Tabla 7. Resultados del Análisis Estabilidad F1A – perfil E4

Fuente: Call&Nicholas (2013)

3.2.6. Análisis de Equilibrio Límite Rajo F5

El rajo F5 corresponde a una fase intermedia pronosticada a ser completada en el año 2022. La Falla Mayor intersecta con un ángulo oblicuo en la pared Este - Sureste del rajo. Las mayores alturas rodean los 650 a 700 metros. Se realizaron varios análisis con el propósito de encontrar en qué área del rajo interceptaría la falla. El *buttress* fue evaluado para determinar el ancho requerido para lograr factores de seguridad entre 1.1 y 1.2. El ancho del *buttress* para ambos criterios fue señalado en el rajo F5 para mostrar la potencial zona de inestabilidad asociada a la Falla Mayor.

Los datos de rumbo y manteo de la Falla Mayor deben ser validados en la medida que se realicen las diversas expansiones del rajo. Sobre todo, una vez que estas sean detectadas se podrá evaluar si será necesario o no hacer alguna modificación en el diseño de esta pared en esta etapa de la explotación del rajo. Por lo que, se podrían requerir cambios en el diseño para reducir en ángulo global e inter-rampa en esta área del rajo si la ubicación de la falla es desfavorable para la estabilidad de la pared.

3.2.7. Análisis del Modelamiento numérico con Flac

Se utilizó el programa FLAC para estimar el efecto que produce la concentración de tensiones en la pata del talud de las Secciones 2 y 5 del rajo 2032. Los

modelos creados convergieron sin despresurización para IRA de 50° en la zona primaria. Cabe señalar, que utilizando la resistencia del macizo C&N en el análisis de equilibrio límite, el factor de seguridad obtenido en condiciones no drenadas para la Sección 2 fue de 1.27, con una probabilidad de falla de 0.12. Sin embargo, para satisfacer los criterios de aceptabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, es requisito drenar el talud de 100 a 150 metros bajo la superficie.

Por otra parte, la Sección 2 fue analizada mediante un modelo discreto de la Falla Mayor; Este modelo llegó al equilibrio drenando a una profundidad de 150 metros bajo la superficie del talud. Se produjo una zona de tensiones en el talud debido a la Falla Mayor, que produjo una liberación de presión y reajustes a lo largo de la debilidad de la falla. Este tipo de comportamiento se ha registrado en varios rajos de gran envergadura que tienen zonas grandes de falla en lo alto de sus paredes, pero que no afloran. A medida que cada *pushback* pasa a través una zona no aflorante, la descarga aumenta la tensión desviada y el material de la falla se deforma mucho más que la roca adyacente. Esto crea una tensión en la roca del talud. En muchos casos se recomienda hacer una descarga discretizada de estas zonas para liberar estas tensiones.

3.2.8. Recomendación de Ángulos Inter-rampa

Las recomendaciones de ángulos inter-rampa (IRA) y ángulos globales se resumen para ocho diseños de sectores geotécnicos definidos para el pit final del rajo Catabela, año 2032, representadas en la Ilustración 5 y resumidos en las Tablas 3, 4 y 5.

Las recomendaciones básicas pertenecen a la configuración de un solo banco (16 metros de alto), utilizando tronadura controlada, como es usual en Sierra Gorda. Los ángulos inter-rampa para los sectores uno a ocho, varían entre 45° y 49°. Un sector adicional, Sector 9, se define mediante el modelo de la zona de óxidos. C&N recomienda un IRA de 45° en este sector.

Se recomienda que los valores provisorios de IRA no excedan los mostrados en la Tabla 3. Sin embargo, las paredes de pit final podrían diseñarse con ángulos inter-rampa

de hasta 50° si estos son construidos utilizando bancos simples con pre-corte o bancos dobles con tronadura controlada y pre-corte.

Las recomendaciones para paredes finales están dadas en Tablas 4 y 5.

La revisión de sondajes indica que se pueden esperar hasta 24 metros de sedimentos aluviales en la superficie del depósito dentro del pit final de Catabela. Debido a la cementación moderada, se espera que este material se mantenga a ángulos de por lo menos 40° sobre los escasos 24 metros que estarán expuestos en el rajo. Sin embargo, en el peor de los casos, el material podría deteriorarse ante su ángulo de reposo, el cual no debería ser menor a 34°. Debido a que este material compondría a lo más dos bancos simples, este debe ser excavado como bancos simples con un ángulo inter-rampa de 40°. Si el material falla con su ángulo de reposo, formará un escombros de finas partículas que será contenido por el primer banco. El riesgo de caídas de rocas del sedimento no se considera de importancia.

3.2.9. Conclusiones del Estudio Geotécnico

Basado en la actual información respecto a las propiedades del macizo rocoso y condiciones estructurales, los ángulos inter-rampa se han determinado de 50° para la zona de roca de buena calidad bajo el nivel 1532 y de 45° sobre éste.

3.3. Diseño Técnico del Pit y las Fases

El siguiente paso una vez verificado que el cambio de ángulo de talud es posible en esta sección se presentaran los resultados de los cálculos de las nuevas reservas, diseño de fases operacionales y planes mineros.

3.3.1. Cálculo de nuevo Pit Óptimo

Para calcular el pit óptimo del rajo, es necesario obtener el ángulo global resultante por el aumento del ángulo inter-rampa en la pared, basados en las recomendaciones de C&N.

Se calcula la envolvente económica basado en los algoritmos de Cono Flotante o Lerch & Grossman, los cuales darán los límites económico del depósito, basado en la recomendación de Angulo Global (43°) tal y como lo muestra la tabla 8, los precios de los metales, los recursos planteados, y el modelo de bloques con las leyes estimadas por la geoestadística.

Posterior a esto se procede a diseñar de manera operativa sobre estos límites económicos, incluyendo las nuevas recomendaciones de ángulo inter-rampa, tamaños de rampas operativas y tamaños de banco adecuados al tipo de proyecto.

Ángulo Global	(°)
Factibilidad	36
Actual	43

Tabla 8. Comparación de Ángulo Global.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan una serie de comparaciones entre el nuevo Pit óptimo obtenido con las recomendaciones de C&N, y el pit óptimo existente en el proyecto (Caso Base).

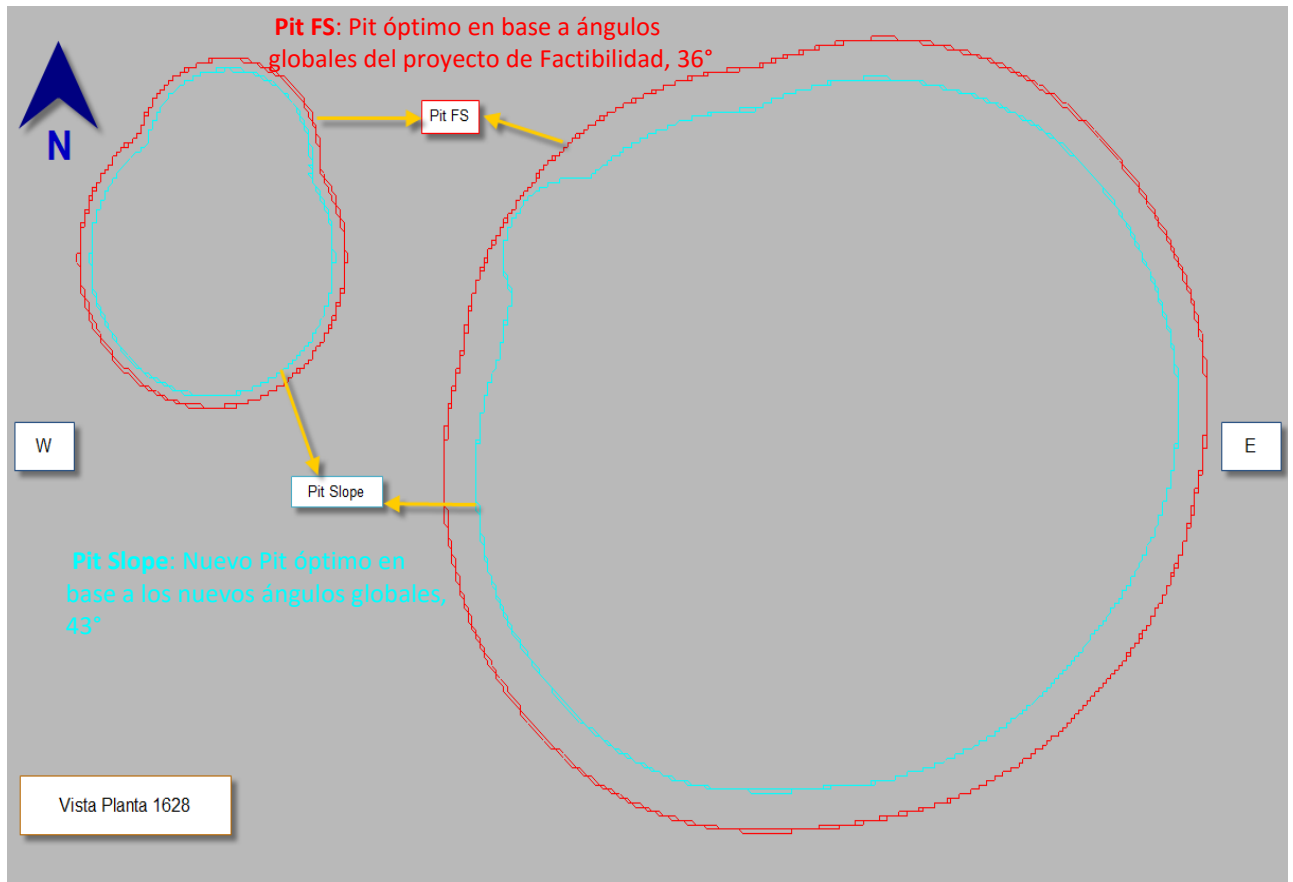


Ilustración 7. Comparación Pit Óptimo, vista en planta.

Fuente: Elaboración Propia.

Es evidente en la Ilustración 7, como el nuevo pit generado en color azul, se encuentra con un menor diámetro, lo cual indica que el cono formado desde su base, se hizo con un ángulo mucho más pronunciado o inclinado (Efecto ángulo Global).

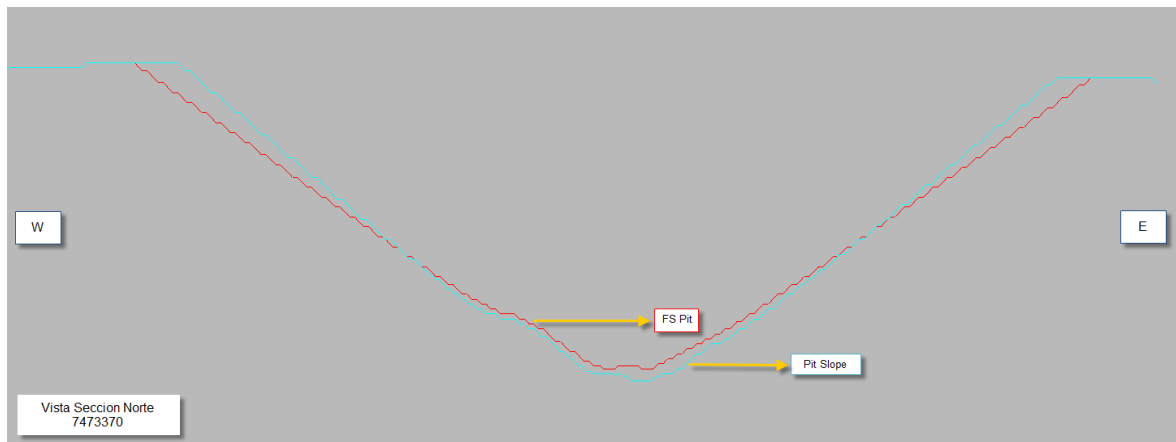


Ilustración 8. Comparación Pit Óptimo, vista en sección.

Fuente: Elaboración Propia.

Esta Ilustración 8, claramente destaca un punto de equilibrio entre las dos fases, lo cual demuestra hacia arriba, un ángulo mucho más pronunciado con un diámetro menor (Menor extracción de lastre), y hacia abajo un ángulo más pronunciado con un diámetro mayor (Mayor extracción de mineral en fondo).

3.3.2. Diseño Operacional de Fases

Posterior a la generación del pit óptimo, se comienza con el secuenciamiento económico de las fases y su posterior diseño operativo como tal.

La siguiente tabla muestra brevemente cuáles fueron los ángulos utilizados en el diseño y cuánto fue el cambio comparando el mismo con los diseños iniciales (ver Tabla 9).

Nivel	Ángulo Inter-rampa (IRA)		Ángulo Cara de Banco (BFA)		Tipo de Banco		Comentario
	Actual	Factibilidad	Actual	Factibilidad	Actual	Factibilidad	
Topo a 2 bancos inferiores	40°	40°	70°	65°	Simple	Simple	Zona de chusca o grava
1660 a 1532	45°	40°	70°	65°	Simple	Simple	Zona de transición con óxidos

1532 a fondo	50°	40°	73°	65°	Doble	Simple	Zona de mineral sulfurado
--------------	-----	-----	-----	-----	-------	--------	---------------------------

Tabla 9. Comparación de Ángulos de talud inter-rampa

Fuente: Informe de Factibilidad AKL.

3.3.3. Comparación Operacional Pit Final

En la siguiente Ilustración se observa cómo el nuevo ángulo de talud genera una nueva geometría más estrecha y más ajustada en tamaño de rajo, este efecto es logrado al contener un ángulo mucho mayor.

Adicional a esto, las Ilustraciones 9, 10 y 11, muestran como el nuevo diseño es mucho más operativo respecto a los diseños antiguos.

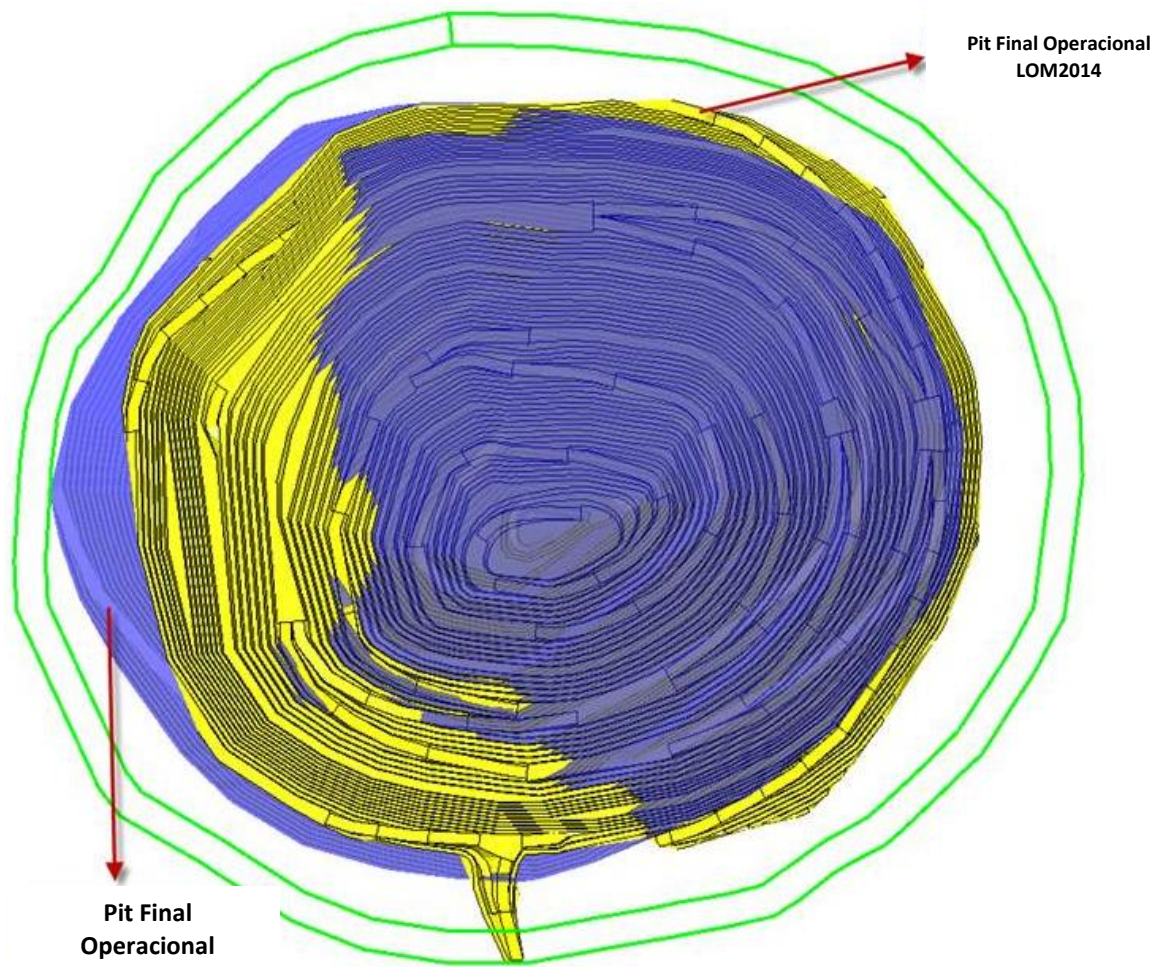
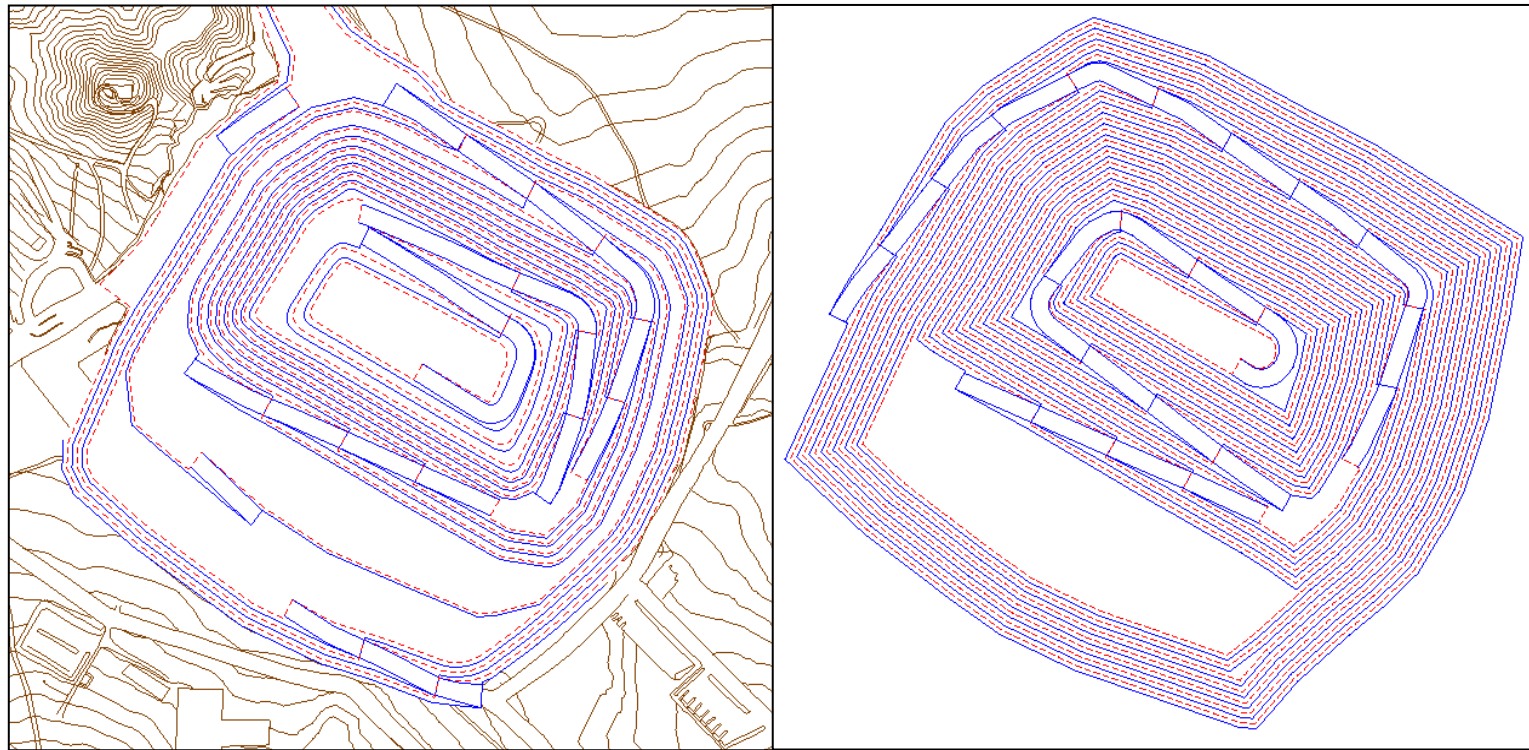


Ilustración 9. Comparación de Diseños LOM 2014 vs LOM de Factibilidad.

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.



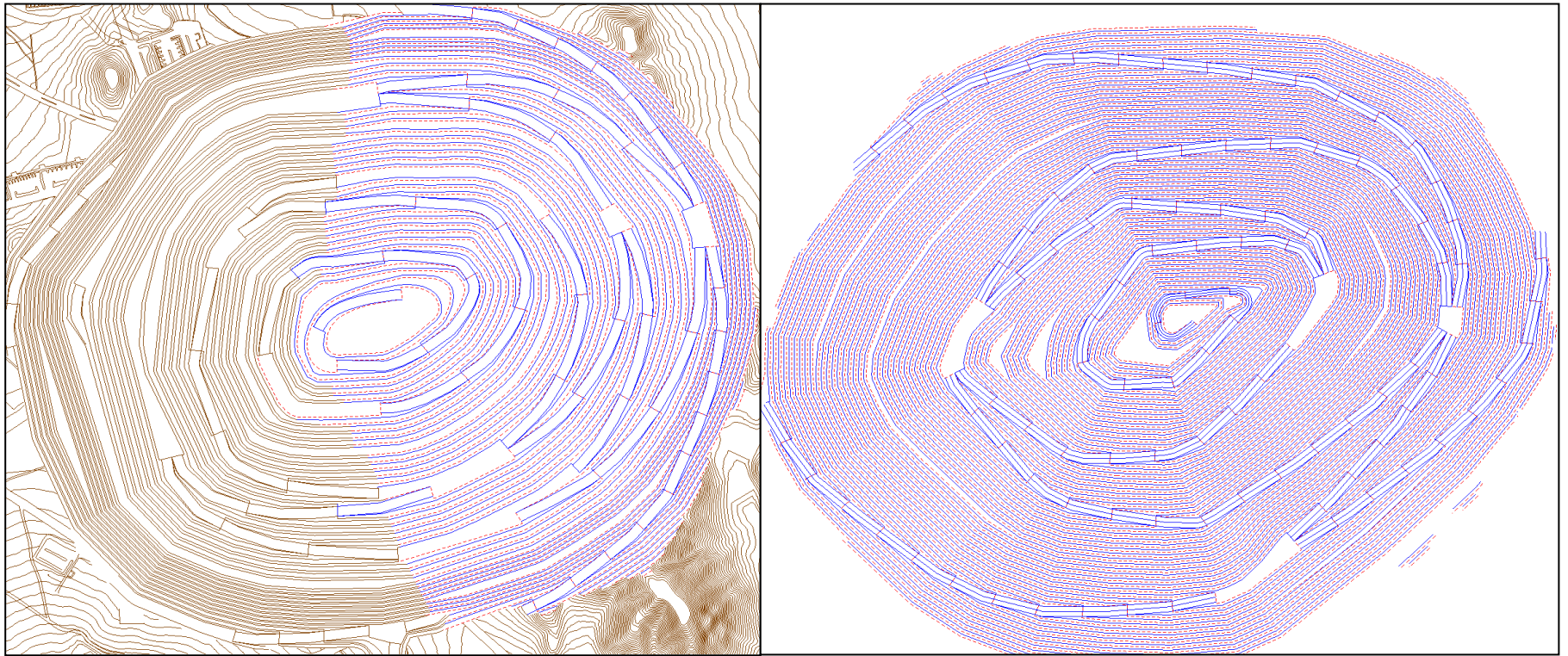
Fase 1A LOM

Fase 1A

Ilustración 10. Diseño Operacional, Comparación Fase 1 A.

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.

El primer desafío al que se enfrentaron los ingenieros y diseñadores de rajo, fue que las fases preexistentes carecían de elementos básicos de un diseño, como lo es la generación de diversas salidas y accesos a los bancos, y el análisis de la mejor dirección para las rampas de extracción.



Fase 7 LOM 2014, Pit

Fase 6 Factibilidad, Pit

Ilustración 11. Diseño Operacional, Comparación Fase 7 Final.

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.

Adicional a lo explicado en la Fase 1A, el cambio de diseños permitió generar o hallar una fase adicional en comparación al set de fases entregado por pre-factibilidad, esto es gracias a la optimización de diseños y a la experiencia en poner en operación estos. Al analizar con detalle, se observa como las rampas juegan un papel importante a la hora de hablar de un buen diseño operativo.

3.3.4. Cubicación de Fases

Al cubicar las fases se obtiene como resultado la razón de lastre / mineral, impactando positivamente con un mayor incremento en mineral, disminuyendo a su vez tonelaje de lastre (ver Tabla 10).

Fase	Factibilidad		Actual		Diferencia		Razón Lastre/Mineral	
	Lastre	Mineral	Lastre	Mineral	Lastre	Mineral	Factibilidad	Actual
F1	266	43	164	47	(102)	4	6.2	3.5
F2	236	78	190	72	(46)	(6)	3.0	2.6
F3	423	131	319	137	(104)	6	3.2	2.3
F4	469	234	307	177	(162)	(57)	2.0	1.7
F5	379	218	519	268	141	50	1.7	1.9
F6	1,625	566	1,279	482	(345)	(84)	2.9	2.7
F7	-	-	836	232	836	232	-	3.6
Total	3,398	1,271	3,614	1,415	216	144	2.7	2.6

Tabla 10. Cubicación de Fases, Razón Lastre / Mineral

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.

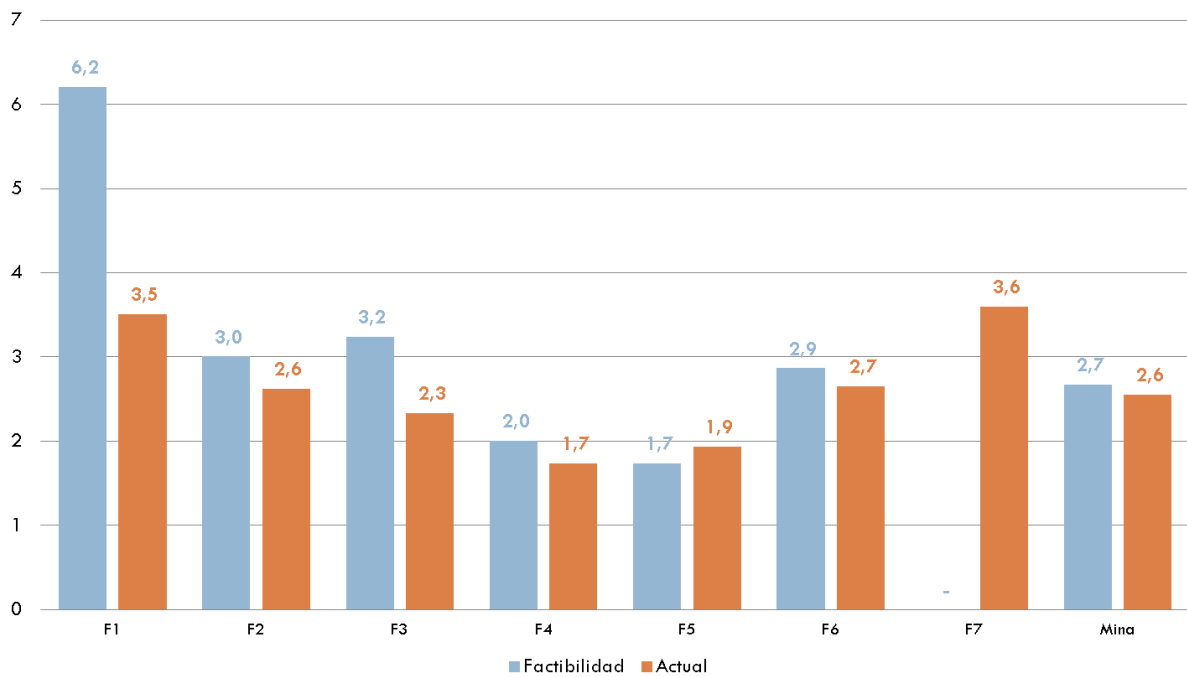


Ilustración 12. Razón Lastre / Mineral por Fases.

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.

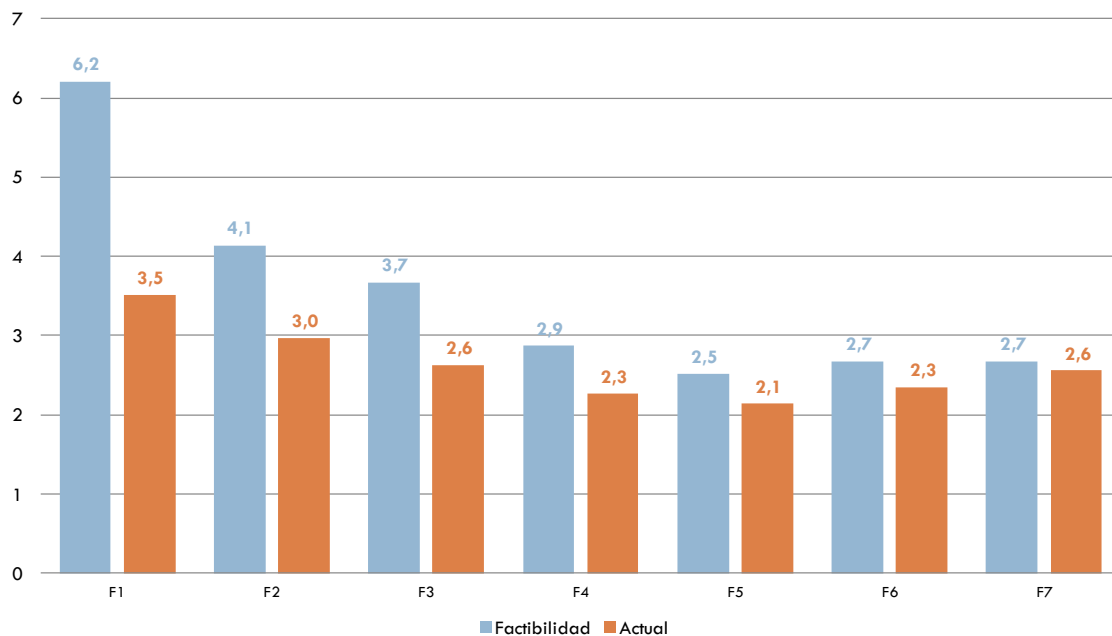


Ilustración 13. Valorización Económica del Plan Minero LOM.

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.

El esquema de la Ilustración 14 muestra las etapas del proceso de planificación de la vida de la mina “Life of Mine” (LOM).

LOM 2014 Activities

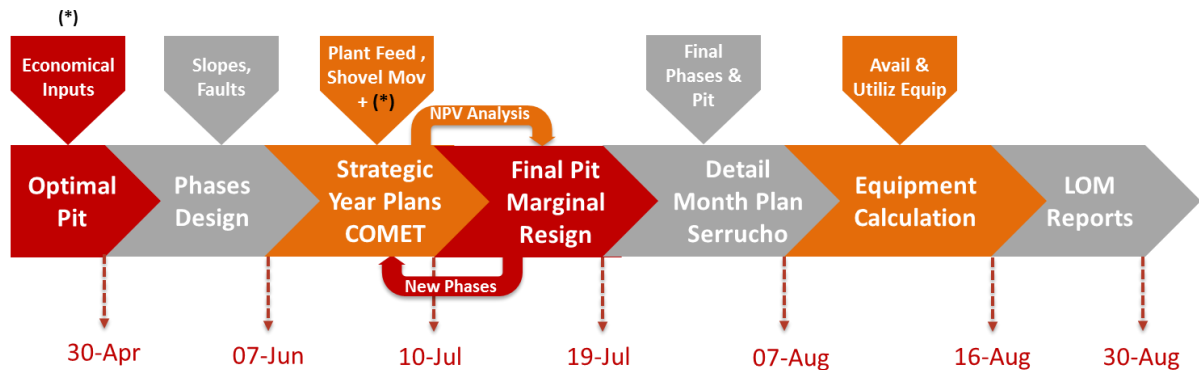


Ilustración 14. Proceso de Planificación LOM (Life of Mine) en Minera Sierra Gorda SCM.

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.

El proceso LOM es aquel se determina la vida de mina, en términos de años de explotación del rajo, extrayendo las reservas de mineral económicas rentables.

Es en este proceso, que el aumento de ángulo de talud incrementa el NPV de la compañía, especialmente en los primeros años, al extraer menor tonelaje de lastre y mayor cantidad de mineral como muestra la tabla 10 de la sección 3.3.4.

El resultado de este proceso es el plan minero LOM 2014, en donde el ángulo de talud es un factor muy importante y aplica para las dos primeras etapas del proceso.

Una vez revisadas las estrategias y resultados preliminares de los diferentes planes mineros, realizados con el apoyo del software COMET, se procede a evaluar el valor económico del Plan Minero Final.

Para realizar la Evaluación del Valor Económico se utiliza el software COMET, que permite realizar varios casos de planes mineros estratégicos. En esta herramienta se ingresan las variables importantes como:

- Modelo de bloque geológico
- Parámetros económicos
- Cubicaciones de las reservas de mineral y lastre cortadas por las geometrías de los bancos, las cuales tienen incluidas el efecto del aumento del ángulo de talud

COMET realiza el análisis prueba-error para la mejor secuencia de explotación de las reservas revisando el valor económico hoy y en el futuro, para esto realiza muchas iteraciones para encontrar el mejor valor actual presente (NPV).

El resultado de esta evaluación fue un NPV acumulado de 17% al fin de la vida de la mina (año 2032), y en valores absolutos significa 1 billón de dólares más para la compañía, ver Ilustración 15.

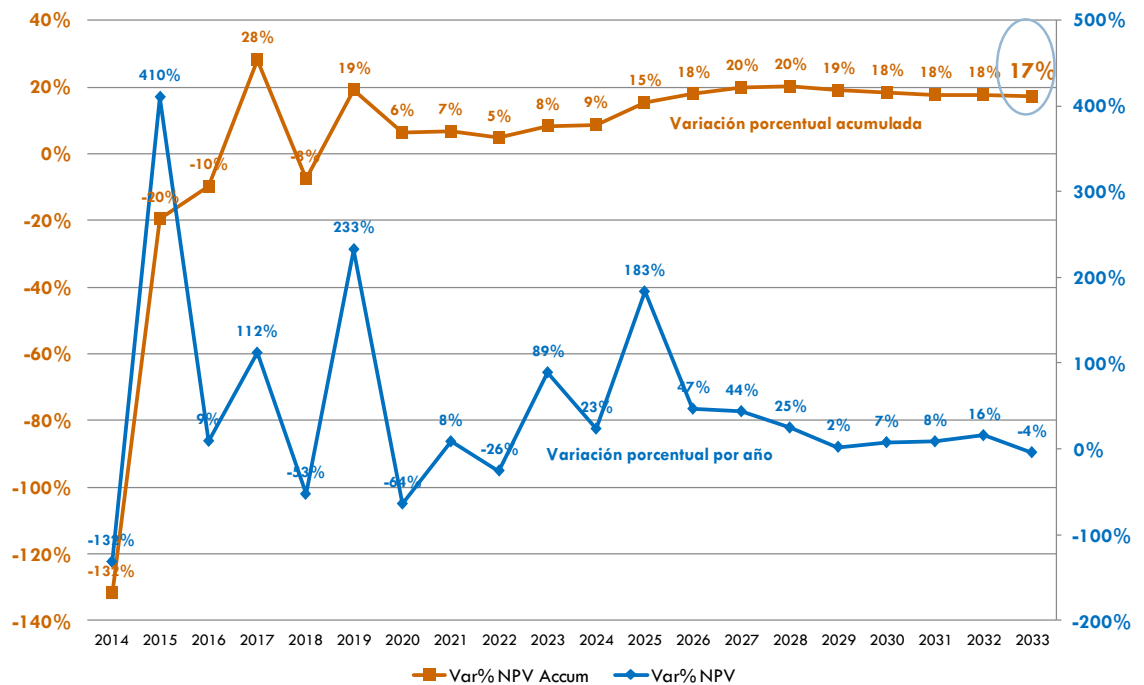


Ilustración 15. Valorización Total del NPV.

Fuente: Sierra Gorda SCM, Ingeniería Mina, Área Largo Plazo.

3.4. Evaluación No Económica del Plan Minero LOM

Los beneficios no económicos rara vez son considerados, al momento de realizar una optimización a un diseño como fue el caso, pero sin duda es un ejercicio muy interesante de realizar y que en esta sección analizaremos a grandes rasgos.

Las externalidades no económicas de este proyecto son producto de una eficiencia en la extracción de mineral. Y para cuyo análisis se usará como principal indicador a considerar la razón que existe entre el material lastre o estéril y el mineral que se extraerá desde mina.

La siguiente tabla compara el caso base con la situación actual, presentada en la sección anterior, pero esta vez resumida de tal forma que permita una mejor comprensión para este análisis.

	Lastre (Billones toneladas) A	Mineral (Billones toneladas) B	Total (Billones toneladas) A+B	Razón Lastre/Mineral A/B	Razón Mineral/Material B/(A+B)
Caso Base	3,398	1,27	4,668	2,68	27%
Actual	3,614	1,415	5,029	2,55	28%
Diferencia	0,216	0,145	0,361	-0,12	1%

Tabla 11. Comparación de datos de producción del Caso Base y Caso Actual.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 11 se puede apreciar las toneladas de material lastre o estéril que se calculó en el caso base y el calculado en el caso actual, así como el mineral que será extraído en ambos casos y la tercera columna indica el movimiento total desde mina, el que incluye

lastre y mineral. Se puede apreciar que el caso actual involucra mayor movimiento de mineral así como de lastre en comparación con el caso base.

La relación lastre / mineral es un indicador que permite valorizar la eficiencia que hay en la extracción de mineral. En el caso actual esta relación es menor a la del caso base, eso implica será más eficiente la extracción de mineral ya que habrá que mover menos material.

En el caso base el movimiento para la vida de la mina de material era de 4,7 millones de toneladas para obtener un 27% de mineral para planta, en cambio en la situación actual se moverán 5 millones de toneladas para obtener un 28% de mineral, este 1% más implica un 1% menos de todos los insumos asociados a perforación, tronadura, carguío y transporte.

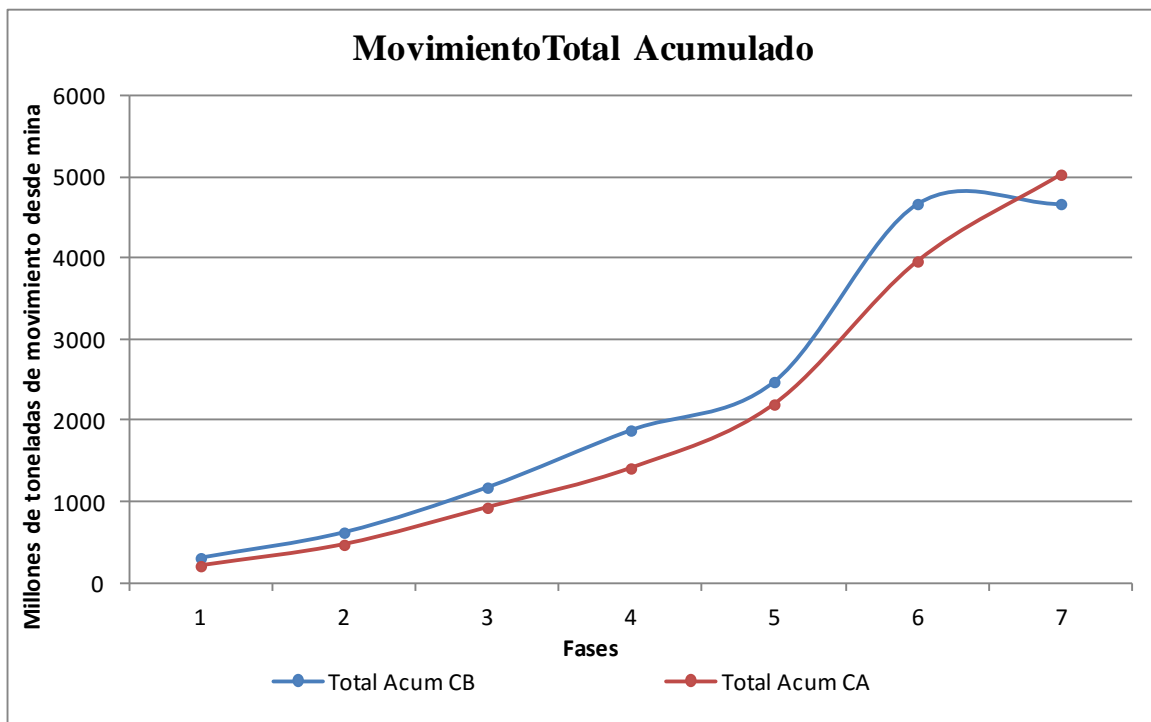


Ilustración 16. Movimiento de Mineral más Lastre desde Mina acumulado por fases.

Fuente: Elaboración Propia.

Lo anterior queda más claro en la Ilustración 16 en donde la línea roja muestra el valor acumulado del movimiento total en el caso actual y la línea azul en el caso base. Queda claro que en todo el periodo habrá menos movimiento desde mina, a excepción de la fase 7 que fue añadida para el caso actual.

En esta sección del informe, no nos centraremos el valor económico de este ahorro, el cual en parte fue considerado en la sección anterior, sino más bien el impacto que significa un 1% menos de todos los recursos que se usaran en toda la vida de una mina en el medio ambiente y en la cultura de una organización.

Respecto al medio ambiente, el impacto del Proyecto Sierra Gorda será de un 1% menos de recursos naturales explotados, gracias a una eficiencia en la explotación del mineral que la considerada en el caso base. Menos recursos naturales extraídos significan menos impacto por su explotación, transporte y desechos finales.

Los procesos involucrados en la Extracción de Mineral son: Perforación, Tronadura, Carguío, Transporte, Mantenimiento de caminos y Botaderos, cada uno intensivo en diferentes suministros e insumos y que al lograr una mejor eficiencia en la extracción de mineral se logra una disminución en el consumo de estos.

La cantidad de agua, energía, diesel, neumáticos, equipos, explosivos y otros insumos está en proporción a la relación lastre/mineral. Si esta relación es menor, como es el caso, se requiere menos de cada uno de ellos para extraer una tonelada de mineral.

Por ejemplo, dos de los principales procesos Perforación y Carguío son intensivos en energía eléctrica proveniente del Sistema Interconectado Norte Grande (SING) y cuya generación está denominada casi en un 100% por centrales termoeléctricas con tres fuentes principalmente, 49% carbón, 42% gas natural y 9% petróleo. Precisamente la obtención de esta energía es más contaminante y no renovable con impactos sobre la salud, el agua y el medio ambiente.

Además, el material particulado también disminuye principalmente por dos razones, la primera es que al modificar el ángulo se disminuye el movimiento de material en

las primeras fases donde se encuentra la chusca que por sus características genera mayor polución al moverla y en general por el menor movimiento de material en todas las fases.

Para resumir se presenta la siguiente tabla que muestra los efectos en el consumo de insumos y suministros producidas por esta eficiencia.

Insumos impactados por la eficiencia producida	
Agua	↓
Energía	↓
Diesel	↓
Explosivos	↓
Neumáticos	↓
Equipos y repuestos	↓
Polución	↓
Tránsito de camiones cerca de comunidades	↓
Exposición a riesgos intrínsecos a la operación	↓
Área destinada a Botaderos	↓

Tabla 12. Impacto en los principales insumos producida por la Eficiencia.

Fuente: Elaboración Propia.

Otro aspecto a considerar, impacta directamente en aspectos intangibles, difíciles de valorizar, pero que cada vez son estudiados con mayor dedicación, y que se relacionan con la cultura organizacional y cómo esta permite a la compañía tomar una posición en la industria.

Las empresas son diferentes entre sí debido a los recursos y capacidades que poseen, que han sido capaces de ir generando, en un momento determinado del tiempo. Dichos recursos y capacidades no están disponibles para todas las empresas en las mismas

condiciones, esto explica las diferencias de rentabilidad entre empresas, incluso entre las pertenecientes a la misma industria.

Las habilidades y capacidades que dispone una empresa para hacer frente al entorno determinan las fortalezas y debilidades de las organizaciones, y son cada día un papel más relevante para definir la identidad de la empresa. Organizaciones o líneas funcionales de estas, que desde su génesis demuestran estar buscando la eficiencia y optimización, tal como es el caso de la Gerencia de Planificación Mina de Sierra Gorda, facilitan la formulación e implementación de estrategias que permitirán conseguir una ventaja competitiva sostenible para la empresa si se logran institucionalizar y hacerlas cultura.

Estos recursos intangibles, observados en el proyecto de cambiar el ángulo de talud, como la innovación, promoción del cambio, conocimientos, motivación, son activos de gran beneficio, que hay que potenciar, implementar en toda la compañía y gestionarlos para que cooperen entre sí para el beneficio de la compañía.

3.5. Manejo del Cambio

La modificación de ángulo inter-rampa y global para el pit de Sierra Gorda es manejado como un cambio que resulta en nuevas condiciones de diseño, donde es necesario administrar los riesgos potenciales generados en donde se ven involucrados procesos, actividades, equipos y la organización.

Los cambios pueden tener el potencial de generar incidentes o alterar visiblemente un proceso, como es el caso, por lo tanto es importante realizar una gestión del cambio con el propósito de adelantarse a estas posibilidades y evitar problemas.

La gestión de cambio, por lo general, frente a un cambio permanente tiene las siguientes etapas:

- Identificación del Cambio

- Evaluación del Cambio
- Aprobación o Rechazo del Cambio
- Implementación del Cambio
- Monitoreo y Revisión del Cambio
- Cierre del Cambio

En el proceso de evaluación de un cambio, es muy importante tener en consideración a lo menos:

- Los beneficios estimados: es el momento de verificar que la inversión no es desproporcionada con respecto al beneficio del cambio o si realmente es necesario y agrega valor.
- Riesgos asociados y plan de mitigación: evaluar la potencialidad de los cambios internos o externos, determinando si introduce nuevos riesgos o controles a los ya existentes en Seguridad, Salud, Medio Ambiente, Comunidad/Patrimonio, Regulatorio, Administrativo, Financiero y Reputación. En esta etapa es vital descartar el cambio si el nivel de riesgo es intolerable.
- Planificación del Cambio: definir como serán los procesos de comunicación asociados, la documentación debe ser actualizada si aplica.

3.5.1. Evaluación de Riesgos

El cambio de ángulo inter-rampa y ángulo global ha sido ampliamente expuesto en los capítulos anteriores, es por ello que en esta sección se resumirán los beneficios esperados, económicos y no económicos, los riesgos potenciales y sus respectivos planes de mitigación asociados al cambio y la planificación del cambio.

Los riesgos inherentes al diseño, planificación y ejecución del pit no serán considerados como materia de estudio en este informe, el enfoque está en los aspectos que es necesario considerar producto de esta modificación.

En la evaluación de riesgos efectuada por un equipo multidisciplinario se consideraron de alto potencial es la **estabilidad del talud**.

Este riesgo tiene alto impacto en: seguridad con un potencial de causar múltiples muertes, financiero, con la pérdida de equipos, cierre de algún sector del pit o el pit completo y disminución de las acciones, y reputación al ser una noticia que dependiendo de su impacto tendrá cobertura regional, nacional e internacional.

Las principales causas que pueden afectar la estabilidad de talud son el diseño y las tronaduras.

Diseño de taludes: es un proceso iterativo, para lograr diseños óptimos de taludes se requiere de un esfuerzo continuo de recolección, interpretación y análisis geológico y geotécnico de los datos, además de las actualizaciones de los requerimientos operacionales respecto del diseño del rajo.

Uno de los controles críticos para eliminar o minimizar el riesgo de pérdida de estabilidad del talud es el **Mapeo de Talud**. A medida que se continúe el proceso de excavación en SGSCM, se deben ejecutar mapeos de celda y mapeos geológicos en los nuevos bancos. El mapeo del rajo requiere de:

1. Confirmación de las características de las fracturas y los parámetros de diseño recomendados en este estudio.

2. Determinación de la posibilidad de aumentar los ángulos en los taludes.

3. Detección de potenciales problemas de inestabilidad.

El mapeo debiera centrarse en:

1. Identificar estructuras mayores a escala intermedia, especialmente aquellas que impacten adversamente en la estabilidad.
2. Localizar filtraciones de agua.
3. Identificar zonas continuas de bajas resistencias en el macizo.
4. Registrar evidencia de posibles desplazamientos en el talud, como grietas de tracción, desplazamientos en las patas o movimientos recientes a lo largo de las estructuras.

A medida que los niveles son expuestos, todas las fallas que cruzan los bancos deben ser mapeadas.

Las estructuras mapeadas en expansiones sucesivas deben ser relacionadas a mapeos anteriores con el uso de software de modelamiento tridimensional. Se debe crear un conjunto de planos y secciones con las fallas geológicas mapeadas. Todas las fallas interpretadas deben ser modeladas en tres dimensiones y proyectadas sobre el rajo final y las fases intermedias para el análisis de potenciales inestabilidades.

Los datos geológicos, geotécnicos y estructurales deben ser compilados rutinariamente. Se debe actualizar el mapa geológico y estructural, por lo menos, una vez al año. Inspecciones de las caras de banco deben ser realizadas periódicamente para verificar el logro de la geometría de bancos y ángulos recomendados.

Otro control para minimizar los efectos de una posible pérdida de estabilidad es el **Monitoreo de Taludes**. Con un diseño económicamente optimizado, se puede esperar cierto grado de inestabilidad en el talud. La minimización de los efectos adversos en la inestabilidad de taludes debe ser logrado a través de monitoreo, planificación juiciosa y establecimiento de contingencias operacionales.

Un desplazamiento en el talud no ocurre sin una advertencia. Antes de un gran movimiento, existe una deformación medible y otros fenómenos observables, como el desarrollo de grietas de tracciones, desmoronamientos y cambios en las aguas subterráneas relacionadas con presiones. Estos fenómenos ocurren desde horas, hasta meses antes de que

haya un desplazamiento mayor. Un programa de monitoreo consiste en la detección sistemática, medición, interpretación y reporte de las evidencias de inestabilidad.

Un programa de monitoreo de taludes es componente esencial en operaciones mineras. Muchas propiedades usan una variedad de prácticas de monitoreo incluyendo mapeos, inspecciones automatizadas, extensómetros, inspecciones de escaneos láser y escaneos de radar. Invertir en un programa de monitoreo durante las fases iniciales de excavación, para desarrollar un plan de manejo de taludes como parte integral del proceso minero. Condiciones seguras en terreno sólo puede ser garantizadas con un programa de monitoreo agresivo comunicado con los departamentos geotécnicos y operacionales.

Los objetivos del programa de monitoreo de taludes son:

1. Mantener la seguridad en los procedimientos operacionales para la protección del personal y de los equipos.

2. Proveer advertencias anticipadas de inestabilidad, para que la planificación minera pueda ser modificada poder minimizar el impacto de desplazamientos del talud.

3. Proveer información geotécnica para el análisis de mecanismos de desplazamientos en el talud, para el diseño de soluciones apropiadas y para rediseños del talud.

C&N recomendó que se adquiriera el siguiente equipo de monitoreo de taludes para usarlo en la implementación de las recomendaciones de diseño presentadas en este informe. Este equipo debiese ser adquirido prontamente para implementar un fuerte programa de monitoreo antes en la aparición de inestabilidades.

Los equipos recomendados incluyen:

- 1 escáner de radar (IDS, Reutech o GroundProbe)
- 1 estación robótica total
- 4 extensómetros con cable automatizados

- 1 unidad de escaneo láser

Otra causa que puede afectar negativamente la estabilidad del talud son las **tronaduras**. Es por ello que un control crítico son tronaduras controladas usando pre corte y bancos simples.

Se recomienda que el ángulo inter-rampa de 50° sea logrado usando pre corte y bancos simples de 16 metros de alto. Los bancos simples son más seguros, pues no exceden la capacidad de la pala para el despeje de la superficie y cresta del banco. Los bancos dobles significan más riesgo para el personal y el equipo, debido a que pueden aflorar joints en su superficie y derramar una cantidad importante de material en un corto periodo de tiempo. El volumen del material derramado en un banco doble incrementa geométricamente comparado a un banco simple, porque es una función del cuadrado de la altura del banco. Las fallas en bancos dobles pueden causar daños significativos en equipos grandes. Mientras más información se obtenga de fallas y joints, podría definirse una condición favorable para la construcción de bancos dobles. Sin embargo, a esta altura, la recomendación será de utilizar bancos simples con tronadura controlada, incluyendo pre cortes, para lograr los 50° en los taludes finales.

Para lograr bancos de 16 metros de altura con ángulo inter-rampa de 50°, se requiere que el ángulo cara de banco sea de 70°. Esto resultará en un banco de ancho 7.8 metros, el cual puede contener material de roca caído del banco superior, de acuerdo al criterio modificado de Ritchie. El objetivo es alcanzar este ancho de 7.8 metros con un porcentaje de confianza de un 80%. El sulfuro primario en Sierra Gorda es fuerte, tiene un alto RQD y un RMR relativamente alto. En la mayoría de los casos, esta roca puede pre cortarse sin problemas. En algunas áreas, puede que el pre corte no parezca haber funcionado bien, pero en realidad, reduce el daño en la roca y los bancos serán más confiables.

La tronadura con pre corte inicia una grieta que define la cara del banco, y este patrón lineal de tronadura es iniciado antes del comienzo de la tronadura y de los patrones

de tronadura suave. Si se forma una buena grieta, las vibraciones de la tronadura principal son reflejadas en el macizo rocoso, protegiendo la superficie de la cara del banco.

El pre-corte suma costos a la operación de tronadura, pero el beneficio logrado, permitiendo la construcción de ángulos inter-rampa más pronunciados y banco más confiables, es mucho mayor. El costo de realizar pre-corte es una función lineal basada en el largo del patrón de pre-corte.

Los bancos excavados deben ser revisados rutinariamente para asegurar que los anchos de berma y los ángulos cara de banco cumplan con lo esperado. Cada diseño de tronadura que impacta una pared final debe ser documentado y los datos que incluyen tipo de roca, alteración, sistemas de joints persistentes, diseño de tronadura controlada con espaciamiento y dimensiones de cargas para tronadura y pre-corte, niveles de vibración y gráficos de ángulos de cara de banco acumulados derivados de escáneres deben ser recolectados. Escaneos de cada pared excavada deben ser realizados y se debe hacer una comparación entre la distribución de los ángulos cara de banco medidos y los estimados por el análisis *brackbreak*. Se tendrán que hacer ajustes al diseño de tronadura, si los ángulos y anchos en los bancos son menores a lo esperado. Además, los escaneos ayudarán a determinar si el diseño está siendo logrado. Si se nota que las patas están “*hard*”, se podría requerir agregar más explosivo en el fondo de la línea de pre-corte o aumentar la sub-perforación de los agujeros de pre-corte.

3.5.2. Aprobación del Cambio

El cambio fue aprobado por KGHM Polska Miedz, Sumitomo Metal Mining y Sumitomo Corporation considerando que el aumento del ángulo de talud agrega valor a la compañía, los beneficios estimados son adecuados y el riesgo esta adecuadamente manejado y que el riesgo residual es tolerable.

Este aumento de ángulo para el pit de Sierra Gorda también fue autorizado por una de las partes interesadas y que es la entidad regulatoria a nivel nacional. Cabe mencionar que esta autorización también fue considerara por Minera Sierra Gorda como una medida de

control adicional que permitió validar la efectividad de las medidas de control comprometidas.

La aprobación del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) partió en el mes de Septiembre del 2013, donde se presentó el estudio especializado del incremento del ángulo de talud por la parte de Sierra Gorda SCM con el apoyo de AKL Ingeniería.

Y con fecha 14 de Noviembre del 2013 el SERNAGEOMIN aprueba el aumento del ángulo, emitiendo la Resolución Exenta n° 1412/2013. Como lo muestra la siguiente Ilustración 17.



RESUELVO:

1. **APRÚEBASE** el Proyecto "Diseño Geotécnico de Taludes para Pit Final Año 2032 Ingeniería de Factibilidad Rajo Catabela" de la Empresa Sierra Gorda Sociedad Contractual Minera, el cual consta de los siguientes antecedentes principales:

- a) **Ubicación** : El Proyecto "Diseño Geotécnico de Taludes para Pit Final Año 2032 Ingeniería de Factibilidad Rajo Catabela", se localiza en la Comuna de Sierra Gorda, Región y Provincia de Antofagasta, Comuna de Sierra Gorda, a 4,5 Km al norte del poblado Sierra Gorda, 1700 m.s.n.m., a 140 kilómetros al NE de la ciudad de Antofagasta y a 60 Km al SW de la ciudad de Calama.
- b) El proyecto presenta las siguientes características técnicas, de acuerdo con sus propios parámetros de diseño:
- **Proceso Utilizado** : Construcción de Rajo Catabela con incremento de ángulo cara de banco, ángulo interrampa y ángulo global respecto de proyecto anteriormente aprobado.
 - **Diseño del Rajo Catabela** : La geometría del rajo se ha sectorizado en función de las fases (función del tiempo de operación) y de las zonas (función de las características físico-mineralógicas de las rocas). Las alturas de banco serán de 16 m con berma de 7,8 m y bancos de 32 m con bermas de 11,0 m. Los ángulos de cara de banco estarán entre 70° y 80°, los ángulos Interrampa serán entre 45° y 50°. Los ángulos globales serán entre 42° y 44°. Todos los ángulos citados son a pit final de 2032.

Ilustración 17. Aprobación por SERNAGEOMIN del aumento en el ángulo de Talud para Minera Sierra Gorda SCM.

Fuente: SERNAGEOMIN.

3.5.3. Implementación del Cambio

La implementación del cambio se realizó inmediatamente aprobado el cambio y asegurada que fueron consideradas todas las medidas de control. Los planes mineros a largo plazo, presentados en la sección 3.3 de este informe, fueron presentados como oficiales para la confecciones de planes a corto y mediano plazo.

3.5.4. Monitoreo del Cambio

Tras un meses de implementado el cambio de ángulo de talud, este ha sido incluido como parámetro para el diseño de planes mineros. Y las recomendaciones, expuestas en la sección 3.6.1 de este informe, para el diseño del pit, el diseño de bancos simples y pre-corte para tronaduras controladas han sido instauradas en los procesos de gestión y operación de la compañía y respaldas en sus respectivos procedimientos.

La adquisición e instalación de equipos para el monitoreo de talud, fue realizada de acuerdo a las recomendaciones dadas, el monitoreo con prismas es parte esencial de unidad de geología de la compañía. Tanto la unidad de Geología, Operaciones Mina y Planificación tienen la responsabilidad de asegurar mediante las acciones de su competencia la estabilidad del talud.

A la fecha del cierre de este informe, el avance del pit se encuentra en según lo planificado con ángulos inter-rampa de 50° tal como se diseñó.

3.5.5. Cierre del Cambio

Para el cierre de este cambio y la consideración de un ángulo inter-rampa de 50° de forma permanente se realizaron las siguientes acciones:

Se verifico que este nuevo ángulo fue incorporado en el documento Life Of Mine (LOM) 2014 de la compañía que es la base para los próximos LOM de Sierra Gorda.

Se verificó que todo el personal asociado a este cambio y asociado a las medidas de control este instruido y capacitado al respecto.

Los riesgos asociados a este cambio fueron incorporados a las matrices de riesgos de la compañía.

Por último se validó que las intenciones del cambio se cumplieron, la razón mineral /lastre actual es 33% versus el 22% propuesto como beneficio para la primera fase.

El cambio se da por cerrado aunque los controles son permanentes y se les da la importancia correspondiente.

4. CONCLUSIONES

El objetivo del proyecto era revisar si era posible obtener un beneficio al elevar los taludes del rajo Catabela de Minera Sierra Gorda en una etapa temprana de explotación. Para ello se encarga un estudio geotécnico para verificar técnicamente esta posibilidad y luego de esto presentar el proyecto a la autoridad competente (SERNAGEOMIN).

Luego de un año de trabajo en el proyecto se ha logrado el objetivo inicial, demostrando a todos los actores involucrados, ya sea, de la compañía como a las autoridades que regulan cambios de este tipo, que el proyecto es técnica y económicamente viable asegurando además todos los aspectos de seguridad involucrados.

Se debe destacar que la gran importancia de este proyecto, es el cambio de los taludes en una etapa temprana de la explotación del rajo, lo cual no es muy común en las compañías mineras debido a la poca cuantificación o visualización de los beneficios potenciales versus las inversiones que se deben llevar a cabo para confirmar el aumento de estos ángulos de taludes.

En términos concretos este proyecto de aumento de ángulos de taludes en el rajo de Catabela de Minera Sierra Gorda SCM, significa un aumento de 1 Billón de dólares en la valorización de la compañía, y para asegurar la implementación de esto no se requiere mucha más que un buen estudio geotécnico que respalde el aumento del ángulo de talud del rajo, mas algunas otra actividades complementarias menores, como la implementación de un sistema de monitoreo de los taludes.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering. Canada.
- Grenon, M., & Hadjigeorgiou, J. (2009). Integrated structural stability analysis for preliminary open pit design. International Journal of
- Rock Mechanics & Mining Sciences, 47(2010) 450–460.
- Recuperado de [http:// www.elsevier.com/locate/ijrmms](http://www.elsevier.com/locate/ijrmms)
- Fleurisson, J. A. (2012). Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach. Procedia Engineering, 46 (2012) 27 – 38. doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.442
- Wyllie, D. C. & Mah, C. W. (2004) Principles of rock slope design. En Wyllie, D. C. (4 Ed.), Rock Slope Engineering (pp. 1-21). London and New York: Taylor & Francis Group.
- Benchmarking Diseño Geotécnico de Taludes. Consultores AKL, Informe para Compañía Minera Sierra Gorda
- Informe “Estudio de Angulo de Talud para SCM” por Call & Nicholas
- Fluor (May 2011). Sierra Gorda 110K / 190K Project Feasibility Study Report
- Karzulovic & Asoc. Ltda. Diseño Geotécnico de Taludes para Pit Final año 2032 Ingeniería de Factibilidad Rajo Catabela
- Informe de estudios de Ingeniería AKL Ingeniería
- Planes LOM años anteriores Minera Sierra Gorda SCM.