

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE
APURÍMAC**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**OPTIMIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN PARA LA
EXPLOTACIÓN DEL TAJO MINASPAMPA, 2012**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE MINAS

Bach. Yucra Huilca Wilber

ABANCAY NOVIEMBRE, 2013

PERÚ

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC	
CÓDIGO	MFN
TIMI y 2013	BIBLIOTECA CENTRAL
FECHA DE INGRESO:	05 FEB. 2015
Nº DE INGRESO:	00408

DEDICATORIA.

***A: Mi Madre,
Andrea, mi Padre Máximo,
En el cielo,
Mis maestros de la Unamba,
Mis colegas de la promoción 2008-II.***

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo no hubiera sido posible sin el compromiso de superintendentes, ingenieros, funcionarios, técnicos y personal de línea de Minaspampa SAC.

A todos ellos mi reconocimiento y mi gratitud.

RESUMEN

MinasPampa, es una mina de oro a tajo abierto, se encuentra ubicada en el norte del país y actualmente está en sus inicios de operación. Los lineamientos sobre cómo explotar el recurso mineral, críticos para la continuidad que compone a esta mina vienen dados por la planificación de largo plazo.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar las etapas de planificación minera a largo plazo, pues determina el resultado económico del proyecto para la Compañía Minera Minaspampa S.A.C, donde apunta a maximizar el valor del negocio. El avance en programas para computadora combinados con habilidades operacionales cada vez mayores, proveen de infinidad de escenarios de diseño, para superar esta dificultad ocasionado por el gran número de escenarios a manejar en el problema se propone como solución el uso de el algoritmo de Lerchs-Grossman, con el que se encontrará el tamaño óptimo del tajo.

En primer lugar para realizar este estudio de trabajo, es necesario que se muestren los antecedentes generales de la planificación, características y parámetros necesarios y avances para la optimización del tajo de Minaspampa luego se presenta el caso a analizar. Este análisis permitirá tomar la decisión en la selecciona el pit final económico al observar el comportamiento de este último frente a los cambios que sufren las principales variables que lo controlan en función de los parámetros técnicos y económicos dados para este análisis.

Una vez seleccionado el pit final se procede a establecer el plan minero, mostrando criterios para la determinación de fases de minado y la aplicación del algoritmo de Milawa para la obtención del programa de producción minero de largo plazo, que nos enseña donde y cuando explotar por periodo con el fin de obtener un resultado óptimo. El análisis se centrará en la comparación de los volúmenes de minerales y estéril a mover por periodo y el valor presente neto (VPN) para la explotación considerando los programas de producción.

Una vez obtenidos los resultados se aplicará un análisis de sensibilidad y riesgo obteniendo medidas de control con el propósito de reducir el riesgo del proyecto.

SUMMARY

MinasPampa, is an open-pit gold mine, is located in the North of the country and is currently in its infancy's operation. Guidelines on how to exploit the mineral resource, critical for the continuity which composes this mine are given for long-term planning.

This paper aims to show the stages of mine long term planning, as it determines the economic result of the project for the mining company Minaspampa S.A.C., which aims to maximize the value of the business. The advance in computer programs combined with operational skills increasingly older, they provide plenty of design scenarios, to overcome this difficulty caused by the large number of scenarios to manage the problem is proposed as a solution using the algorithm of Lerchs-Grossman, that will be the optimum size of the Tagus.

First to perform this work study, it is necessary to the General background of planning, characteristics and parameters to be displayed and advances for the optimization of the open pit of Minaspampa then presents the case to analyze. This analysis will allow the decision on the economic end pit selects it to observe the behavior of the latter against the changes suffered by the main variables that control it on the basis of technical and economic parameters given for this analysis.

Once selected the pit end proceeds to establish the mining plan, showing criteria for the determination of stages of mining and the application of the Milawa algorithm for obtaining the mining production program of long-term, that teaches us where and

when exploited by period in order to obtain an optimum result. Analysis will focus on the comparison of the volumes of minerals and waste to move for period and the net present value (NPV) for exploitation considering the production programs.

Once the results will apply an analysis of sensitivity and risk getting control measures in order to reduce the risk of the project.

INTRODUCCION

La planificación minera, en donde se combina el arte y ciencia a la vez, consiste en ensamblar, adecuadamente, todas las variables que permiten la extracción del mineral. Previamente se requiere un diseño que ejecute los procedimientos de extracción (recursos, personas, equipos). A ese diseño o plan se necesita programar, es decir, ver “qué cosas van a suceder, en qué momento y con qué secuencia.

El objetivo del estudio, es desarrollar el plan de minado y principalmente lograr la mayor rentabilidad posible en la explotación del tajo abierto de los recursos de mineral de oro evaluado, sobre la base de los resultados de la primera etapa de exploración ejecutada los años 2008, 2009 y 2010, para el estudio.

El estudio consiste en la determinación las condiciones técnico- económicas que permita que los recursos de mineral obtenidos, sean económicamente posible explotarlos a tajo abierto, empleando las tecnologías en el beneficio del mineral útil el oro que garanticen un trabajo seguro acorde con la política de la empresa, sin afectar el medio ambiente y en entorno social.

Para poder lograr una buena planificación son muchos los factores que deben considerarse. Desde el capital y recurso disponible, calidad y experiencia de los profesionales involucrados, hasta el estudio y análisis que sirvan como base en la toma de decisiones. Todo ello enlazado con las variables externas que en definitiva guiaran el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	15
1.1. INTRODUCCIÓN	15
1.2. DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
PROBLEMA GENERAL.....	17
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	17
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.5. LIMITACIONES	18
1.6. OBJETIVOS.....	19
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.7. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.8. ALCANCES	21
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. CONSIDERACIONES GENERALES DEL YACIMIENTO	22
2.2. UBICACIÓN Y ACCESOS.	23
2.3. HISTORIA DEL YACIMIENTO Y ESTUDIOS PREVIOS.	24
2.4. GEOLOGÍA.	25
2.4.1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	25
GEOLOGÍA REGIONAL.....	27

2.4.2. ORIGEN DEL YACIMIENTO.....	27
2.4.3. ESTRATIGRAFÍA.....	28
2.4.4. GEOLOGÍA LOCAL.....	30
2.4.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	32
2.4.6. GEOLOGÍA ECONÓMICA.....	33
2.5. BASE DE DATOS.....	33
2.6. TOPOGRAFÍA.....	34
2.7. PERFORACIÓN RCD.....	34
2.8. INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA.....	35
CLASIFICACIÓN DEL RECURSO METÁLICO.....	36
2.9. ANTECEDENTES DE LA PLANIFICACIÓN MINERA.....	38
2.9.1. LA PLANIFICACIÓN MINERA.....	38
PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA.....	40
PLANIFICACIÓN CONCEPTUAL.....	42
PLAN MINERO.....	43
PLANIFICACIÓN OPERATIVA.....	43
2.9.2. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN.....	45
2.9.3. MÉTODO DEL CONO FLOTANTE.....	46
2.9.4. MÉTODO DE LERCHS Y GROSSMAN.....	47
2.9.5. ENVOLVENTE ECONÓMICA.....	56
2.9.6. SECUENCIAMIENTO.....	57

2.9.7. SELECCIÓN DE LA ADECUADA SECUENCIA DE EXPLOTACIÓN	58
2.9.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	66
2.9.9. ANÁLISIS DE RIESGO	68
CAPITULO III: ANÁLISIS PARA LA DETERMINACION DEL PIT FINAL	70
3.1. DETERMINACIÓN DEL PIT FINAL ÓPTIMO	70
3.2. MODELO DE BLOQUES	71
3.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	72
3.4. MODELOS ECONÓMICOS	72
3.5. DETERMINACIÓN DE LA LEY DE CORTE DEL ORO	74
3.6. METODOLOGÍAS UTILIZADAS	75
3.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SELECCIÓN DEL PIT FINAL	79
3.7.1. ANÁLISIS DE LA LÍNEA BASE	80
3.7.2. ANÁLISIS EN VARIACIÓN DE TONELAJES A MOVER	82
3.7.3. RAZÓN ESTÉRIL/MINERAL	85
3.7.4. VIDA DE LA MINA	86
3.7.5. VARIACIÓN DE PRECIOS	88
3.8. ELECCIÓN DE FASES Y CONSTRUCCIÓN DE PROGRAMA DE PRODUCCIÓN	103
3.8.1. INTRODUCCIÓN	103
3.8.2. DISEÑO DE FASES	104

3.8.3. SELECCIÓN DE FASES DE EXPLOTACIÓN.....	107
3.8.4. LAS RESTRICCIONES.....	110
3.8.5. PLAN DE MINA DEL PIT ÓPTIMO.....	113
3.8.6. LAS RESTRICCIONES.....	119
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	123
4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGO.....	123
4.1.1. INTRODUCCIÓN.....	123
4.1.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	124
4.1.3. RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD DE LERCH GROSSMAN.....	128
4.2. ANÁLISIS DE RIESGO.....	128
CONCLUSIONES.....	135
RECOMENDACIONES.....	137
BIBLIOGRAFÍA.....	138
ANEXO.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del proyecto Minaspampa	142
Figura 2: Columna Estratigráfica del norte Perú.....	30
Figura 3: Vista isométrica 3D de la superficie topográfica del proyecto Minaspampa.....	143
Figura 4: Ubicación de los taladros RCD con sus trazas - proyecto Minaspampa.....	144
Figura 5: Modelo de bloques con los recursos clasificados - proyecto Minaspampa.....	145
Figura 6: Modelo de bloques con las leyes de oro - proyecto Minaspampa.....	146
Figura 7: Proceso de planificación.....	40
Figura 8: Planificación estratégica.....	41
Figura 9: La planificación Minera y los proyectos.....	42
Figura 10: Planificación minera interna	43
Figura 11: Horizontes de planificación y agregación de valor.....	44
Figura 12: Esquema de pits óptimos generados por una secuencia de precios de productos.....	57
Figura 13: Matriz de bloques con sus correspondientes valores económicos.....	59
Figura 14: Diseño final de la explotación a través del método del cono flotante.....	60
Figura 15: Sección del yacimiento incluyendo el triángulo que contiene el máxima tajo.....	61
Figura 16: Bloques que deben ser extraídos antes de la explotación del bloque 36.....	61
Figura 17: Secuencia de extracción óptima para el ejemplo de la figura 13.....	64
Figura 18: Diseño final del tajo y secuencia de extracción optima.....	65
Figura 19: Gráfico de análisis de sensibilidad de un proyecto.....	68

Figura 20: Posible representación para un modelo geológico.....	71
Figura 21: Evaluación económica de un modelo económico.....	73
Figura 22: Metodología de trabajo.....	75
Figura 23: Principales variables en el negocio minero.....	147
Figura 24: Esquema de pits óptimos generados por una secuencia de precios oro.....	78
Figura 25: Secuencias de extracción Worst Case (izquierda) y Best Case (derecha).....	79
Figura 26: Gráfico VPN v/s pit Caso base.....	81
Figura 27: Tonelajes de los distintos pits.....	82
Figura 28: Variación VPN.....	85
Figura 29: Razón estéril-mineral v/s Pit.....	86
Figura 30: Vida vs pit.....	87
Figura31: VPN (diferentes precios) v/s pit.....	90
Figura 32: Variación VPN con respecto al pit 42 v/s precios.....	91
Figura 33: VPN vs Costos mina.....	93
Figura 34: VPN vs costo planta.....	94
Figura 35: VPN vs recuperación.....	96
Figura 36: Variación VPN vs recuperación.....	96
Figura 37: Contornos de pit final a diferentes ángulo de talud.....	99
Figura 38: Secuencia del pit en orden decreciente (Mathieson, 1982).....	105
Figura 39: Secuencia banco por banco.....	106
Figura 40: Ancho mínimo de la secuencia.....	108
Figuras 41: Ejemplo para aplicar la secuencia minera.....	115
Figuras 42: secuencia de extracción minera opción 2.....	116
Figuras 43: secuencia de extracción minera opción 3.....	116
Figuras 44: secuencia de extracción minera opción 4.....	117
Figura 45: Análisis de sensibilidad.....	125
Figura 46: Análisis de sensibilidad tornado.....	127
Figuras 47: Distribución de variables.....	131
Figura 48: Análisis de riesgo.....	133

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Distancia y tiempo de recorrido hacia el proyecto Minaspampa.....	24
Tabla 2: Tipo y número de muestras utilizadas en la estimación.....	34
Tabla 3: Listado de los códigos geológicos y densidades para el modelamiento geológico.....	36
Tabla 4: Parámetros usados para la clasificación de los recursos.....	36
Tabla 5: Inventario de los recursos estimados del proyecto Minaspampa.....	38
Tabla 6: Origen del modelo económico Minaspampa.....	72
Tabla 7: Hoja de cálculo del revenue factor	148
Tabla 8: Resultados obtenidos por cada uno de los pit anidados.....	149
Tabla 9: Comparación de cada pit frente al máximo VPN en cada caso.....	84
Tabla 10: Comparación entre mayores VPN para cada estrategia.....	89
Tabla 11: Variación de costos vs pit.....	93
Tabla 12: Variación NPV/Costo procesamiento.....	151
Tabla 13: NPV/Recuperación.....	151
Tabla 14: Variaciones de ángulos para distintos casos.....	98
Tabla 15: Variación ángulo de talud.....	98
Tabla 16: Resumen resultados.....	101
Tabla 17: Selección de pit final.....	101
Tabla 18: VPN selección de fases.....	112
Tabla 19: Fases seleccionadas.....	112
Tabla 20: Datos de entrada Milawa VPN.....	120
Tabla 21: Resumen plan minero material explotado y tratado.....	121

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

La Planificación Minera, tanto en Perú como en el extranjero, se ha basado tradicionalmente en modelos geológicos de recursos, construidos a partir de estimaciones determinísticas de las características constitutivas de los yacimientos, tales como leyes, densidad de roca, tipo de litología, entre otras, mediante alguna técnica geoestadística. Esto significa que la información tomada como representación y predicción de la realidad sobre la cual se planifica y se opera, está conformada por un conjunto de datos exactos, pero generalmente imprecisos, producto de la escasez de información que caracteriza al recurso geológico, como consecuencia de la utilización de mallas de sondajes con distanciamiento típicamente mayor a 40x40 m. Uno de los problemas más grandes que afectan hoy en día al negocio minero es la desviación de los planes productivos y los resultados de operación, reflejado en altos porcentajes de incumplimiento de metas, malas conciliaciones, alto impacto en los costos reales de operación, y en particular, en lo que respecta la planificación de largo plazo, una gran dificultad para estimar oportunidades de negocios y valorizarlos de manera adecuada.

1.2. DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

La variación del precio de los metales es el principal factor de riesgo en la industria minera, y afecta principalmente a los países productores de materias primas, la competitividad de la industria minera conjuntamente con la explotación de yacimientos que poseen cada vez leyes más bajas y el incremento de los costos,

además del tiempo necesario de explotación, la habilidad para manejar el capital invertido para asegurar el retorno a los inversionistas, pueden generar un margen leve entre el éxito y el fracaso.

En el Perú las industrias mineras de explotación son de diversa naturaleza y formas de extracción, todo ello depende del nivel de inversión y tecnología que utilizan. Por ejemplo, cada empresa maneja una política que es diferente según su contexto.

Pretender adaptar una estandarización significa cambios en todas sus etapas de evaluación, para ello se utiliza modelos de optimización, como por ejemplo, teniendo en cuenta la experiencia de la minería chilena, ellos han desarrollado niveles de estandarización importantes. Esta experiencia se está pretendiendo aplicarla en nuestra minería, pero por el momento se está dando en la gran minería. Uno de los elementos para estos cambios, son el uso de tecnologías computacionales, que facilitan la organización y planificación de las etapas de evaluación, antes de lanzar las operaciones propias de minería.

A nivel del estudio que se plantea desarrollar, en la mina de Minaspampa, no se cuenta con toda esta tecnología, sin embargo se puede demostrar su factibilidad aplicando la herramienta informática, y con ello preparar, por ejemplo, el diseño de pit económico y el plan de mina; igualmente se desarrollará algoritmos de estrategias con el fin de optimizar ambas etapas.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

PROBLEMA GENERAL

- ¿Cómo influye la optimización del tajo para la planificación de la explotación Minaspampa 2012?

PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cómo se determina la envolvente económica final haciendo uso de herramienta informática whittle1?
- ¿Cómo está definido los diferentes escenarios para la secuencia de explotación?
- ¿Cómo es el máximo valor presente neto al realizar el análisis de sensibilidad y riesgo?

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La envolvente que representan los tajos finales óptimos, son uno de los resultados más importantes que se obtienen al realizar el análisis de los factores técnico - económico bajo diferentes escenarios y una secuencia de explotación, de acuerdo a

¹ Software de optimización

ciertos parámetros previamente establecidos como retrasos o adelantos entre fases, cantidad máxima de bancos a explotar por períodos, límites y equilibrios entre procesos dentro un proyecto con el propósito de maximizar el VPN² en ambas etapas.

Los diferentes escenarios en la optimización del diseño y planificación de minas a tajo abierto, es poder tomar decisiones acertadas, asegurando la obtención de los mejores resultados técnico-económicos ante las inesperadas alteraciones de las variables que rigen la arriesgada industria minera.

1.5. LIMITACIONES

- El trabajo se realiza en un yacimiento del tipo hipitermal con método de explotación a tajo abierto.
- Todos los planes se confeccionarán en un ámbito de largo plazo.
- Los planes a realizar serán de un carácter operativo.

Se consideran como datos de entrada, y no serán parte de análisis en este trabajo, los siguientes parámetros:

- Modelo de recursos geológicos
- Parámetros geotécnicos y metalúrgicos
- Costos directos
- Parámetros técnicos y de diseño

² Valor presente neto

1.6. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar un pit óptimo y la secuencia de planificación para la explotación del Tajo Minaspampa para el 2012.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la envolvente económica final utilizando las bondades del uso de la herramienta informática whittle.
- Definir los diferentes escenarios para cada secuencia de explotación en base al uso de la herramienta whittle.
- Realizar un análisis de sensibilidad y riesgo para obtener el máximo valor presente neto en cada etapa de evaluación.

1.7. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Existen muchas herramientas, ya sea distribuida por los proveedores de software de minería o desarrollados internamente por las empresas mineras, para optimizar varias partes de un negocio de la minería en forma aislada. Sin embargo, todavía es raro que las empresas intenten optimizar todas las partes de su funcionamiento de forma simultánea.

A nivel internacional una aplicación del método de estrategia de optimización que sea desarrollado, por ejemplo, para la mina de oro a tajo abierto de Fimiston en Australia, donde se confecciono y aplico, la herramienta del software whittle,

En los últimos 10 años, Jeff Whittle ha enfocado la atención en expandir los linderos de optimización para la industria de la minería. El resultado es un enfoque aplicado al negocio minero y al modelo operacional con técnicas de construir en forma integrada: mina, geología, tratamiento, transporte y los modelos de mercado, que son optimizadas por algoritmos poderosos permitiendo la optimización con el propósito de controlar los valores de esas variables que son consideradas negociables. La utilización de este procedimiento, posibilita el desarrollo de planes a largo plazo que maximicen el VPN.

A nivel nacional, en el Perú, en el pasado la vida de la programación de una mina de oro ha sido un proceso en gran parte manual que implicaba la optimización y planificación de cada mina como una entidad separada. La programación ha sido un proceso que consume tiempo utilizando hojas de cálculo. Los recientes avances en el software Whittle han permitido, a varias minas a optimizar y programar al mismo tiempo, de modo que la secuencia de la minería maximiza el valor presente neto, muchas empresas desarrollan por este método de optimización a tajo abierto, tales como Comarsa, Yanacocha, Barric etc.

A nivel local, está en proceso y es motivo del presente estudio.

1.8. ALCANCES

- Proporcionar la base para la optimización y planificación en la valorización de la operación minera. En consecuencia, maximizar el valor del activo minero.

 - Para proyectar volúmenes y calidades de mineral a producir y también proyección de ganancias antes de impuestos.

 - Proporcionar la base para una planificación estratégica.

 - Comprender la importancia de la estructura de capital de una empresa, la cual está muy relacionada con la situación financiera a corto y largo plazo de la misma, para financiar y planear sus operaciones futuras.
-

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. CONSIDERACIONES GENERALES DEL YACIMIENTO

Compañía Minera Minaspampa S.A.C. es una empresa de capitales nacionales, dedicado a la exploración y explotación de yacimientos mineros especialmente de oro diseminado.

Desde el año 2009 se viene explorando las concesiones mineras en la zona Sur del gran alineamiento estructural NW- SE (paralelo a los Andes peruanos), el mismo que se ubica el megaproyecto aurífero Alto Chicama, Mina Santa Rosa, Mina la Virgen, proyecto la Arena y proyecto Algamarca.

Con la información recopilada de estudios realizados anteriores al año 2009 y con los resultados del muestreo geoquímico de superficie en el Cerro Minaspampa efectuados el año 2008, la gerencia de la Compañía Minera Minaspampa, decide realizar exploraciones más detalladas y el año 2009 inician las gestiones correspondientes para la obtención del permiso de exploraciones de categoría II (EIA semi-detallada).

Los resultados de las exploraciones realizadas en los años 2009 y 2010 a cargo de los ingenieros geólogos de la Compañía determinan la existencia de recursos de minerales con una ley de oro y plata. La presencia de alto contenido de plata en el mineral de oro en niveles inferiores indica que es recomendable realizar pruebas metalúrgicas de lixiviación y recuperación mediante el sistema de Merrill Crowe.

Las pruebas metalúrgicas de recuperación en columnas realizadas a fin de determinar el grado de recuperación indican que la recuperación en la etapa industrial estaría en el orden de 70%. El estudio consiste en elaborar el plan de minado a tajo abierto de los recursos de mineral, determinar las reservas y el programa de producción, con base la información proporcionada por el área de geología de la empresa.

2.2. UBICACIÓN Y ACCESOS.

El Proyecto Minaspampa, se encuentra ubicado en el Caserío de Casgabamba, del distrito de Sarín, provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad (ver anexo Figura 1). Está ubicado entre 3900 y 4100msnm, conformando por una orografía accidentada. Geográficamente, el área del proyecto se encuentra ubicado en el flanco oriental de la Vertiente del Pacífico, entre las coordenadas geográficas 7°57'52,31" latitud S 77°59'9,97" longitud W y 7°58'54,38" latitud S 77°57'50,48" longitud W, en cuyo alrededor existen los cerros Minaspampa (E), laguna larga (W) y el cerro Casgabamba (SW).

El acceso a la zona de proyecto desde la ciudad de Lima se realiza por vía terrestre a través de la Carretera Panamericana Norte hasta la ciudad de Trujillo y luego continuando por la ruta de Trujillo – Huamachuco. En la intersección de la carretera asfaltada hacia la Ciudad de Huamachuco y la carretera de acceso al Proyecto “La Arena”, existe un desvío hacia el lado derecho continúa una carretera carrozable por la ruta al distrito de Sarin cuya carretera llega hasta el proyecto Minaspampa (tabla 1).

Existe otro acceso desde la ciudad Trujillo, por la ruta en dirección a la Compañía Minera San Simón, considerando el desvío contrario del ingreso a la ciudad de Huamachuco, el cual permite seguir la ruta hacia Sarín. El tramo de la carretera de Trujillo a Cía. Minera San Simón, es afirmada; la continuación del tramo de Minera San Simón hacia el Distrito de Sarín es una trocha carrozable y accidentada en un tramo aproximado de 45 km., hasta llegar a un desvío de 30 - 35 km. antes de hacer la entrada al Proyecto se pueden visualizar 03 lagunas de camino de herradura y accidentada que conduce hasta el proyecto.

Ruta N° 2	Tipo de vía	Km	Tiempo de viaje (Hrs)	
			Parcial	Acumulado
Lima-Trujillo	Asfaltada	561	8h:0min	
Trujillo-Same	Afirmada	50	0h:45min	8h:45min
Same-Agallpampa	Afirmada	34	1h:15min	10h:00min
Agallpampa-shorey	Afirmada	41	1h:35min	11h:35min
Shorey-Desvio a Huamachuco	Afirmada	9	0h:30min	11h:45min
Desvio a Huamachuco-Minaspampa	Carrozable	42	1h:40min	13h:25min

Tabla 1: Distancia y tiempo de recorrido hacia el proyecto Minaspampa

2.3. HISTORIA DEL YACIMIENTO Y ESTUDIOS PREVIOS.

A mediados de 1999, se dieron inicio a las labores de exploración y explotación minera en la zona del Cerro de Minas Pampa, en el año 2010, se realiza un Contrato de Cesión Minera con el Sr. Alfredo Sánchez Miranda y Sr. José Sánchez Miranda a favor de Cía. Minera Minaspampa, con la finalidad de cederle el derecho minero Paula Isabel V, San Pablo 3E y La Codiciada de Oro N°1, el cual se encuentra inscrito en Registros Públicos de la ciudad de Trujillo.

2.4. GEOLOGÍA.³

2.4.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

En el área de la mina afloran unidades sedimentarias perteneciente al Grupo Goyllarisquizga, se conoce el afloramiento de rocas sedimentarias de las formaciones: Santa-Carhuaz, compuesta por lutitas, areniscas, limonitas y delgados horizontes de caliza; esta formación, sobreyace concordantemente a las areniscas y cuarcitas de la formación Chimú, de edad Cretácica Inferior; que a su vez, yace en contacto con las lutitas, pizarras negras y areniscas de la formación Chicama del Jurásico Superior. En la zona oeste y cubriendo a todas estas formaciones, existen potentes bancos de dacitas, aglomerados y tufos volcánicos, pertenecientes a los volcánicos terciarios inferior. Cortando a todas estas formaciones se ubican alineados en la orientación N-S, una serie de intrusivos sub volcánicos.

Toda la secuencia ha sufrido procesos erosivos del cuaternario, especialmente el periodo glacial y la remoción fluvio-glacial, luego las grandes avenidas y lluvias, han producido abundantes depósitos o suelos, que en el área del proyecto tienen gran importancia para el proceso de infiltración de las aguas de precipitación y escorrentía superficial. Los sedimentarios han sido cortados por diversos intrusivos. Existen también diques delgados y stocks irregulares de dacita. Estructuralmente se reconocen 2 importantes fallas sub-paralelas de rumbo NW-SE denominadas candela y cerro el oro, ambas fallas conforman un graben donde se emplaza la

³ Fuente: Neil, R. (2010) Plan de minado a tajo abierto proyecto Minasampa para el estudio de factibilidad

mineralización en vetillas de 60cm. El sistema de fallas tuvo fuerte influencia en la mineralización, siendo conductos de la mineralización primaria.

El depósito Candela consiste de vetillas reconocidos con una extensión de 1kilómetro en dirección WNW-ESE y 0,5 kilómetros aproximadamente en dirección NNE-SSW. Estas vetillas se encuentran concordante estratificación de las areniscas con dirección NW con buzamiento 50° NE ocasionados por el emplazamiento de stocks intrusivos dacíticos de edad Terciario Inferior, controlados principalmente por un Sistema de fallas.

Originalmente la mineralización estuvo compuesta principalmente por hematita y pirita, posteriormente se presentó un periodo de intemperismo, que permitió la presencia de un horizonte de enriquecimiento supergénico de 80 a 100 metros de potencia, afectando las vetillas existentes.

La zona de estudio se divide en dos sectores: candela (sector SE del cerro minaspampa) y cerro el oro (sector SE del cerro el oro).

Dependiendo del grado de intemperismo, se definen 3 tipos de mena económicos: óxidos, sulfuros y mixtos (entre óxido y sulfuros).

Se ha determinado también la existencia de una cancha de desmonte. Estas se pueden diferenciar entre antiguas con material de grano medio a grueso y los desmontes más reciente con material fino a muy fino. Estos materiales contienen importantes valores de Au que pueden ser tratados por lixiviación.

GEOLOGÍA REGIONAL.⁴

El área del proyecto Minaspampa se encuentra ubicada en el sector septentrional de la Cordillera Occidental de los Andes, con coordenadas UTN de un punto central 171750E y 9118250N. Su morfología en general agreste, con valles encañonados y escarpas rocosas, es condicionada principalmente por factores estructurales y litológicos.

La estratigrafía regional se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias con edades del Jurásico superior al Cuaternario reciente, fuertemente plegadas y falladas, constituidas por las formaciones Chicama, Chimú, Santa- Carhuaz, Farrat, Inca, Chulec y Pariatambo. Esta secuencia es cubierta por depósitos recientes.

El marco estructural está dado por el intenso tectonismo que ha afectado a esta región, evidenciado por la presencia de numerosas fallas kilométricas de orientación andina (NO-SE), y plegamientos normales e invertidos. A nivel regional, se aprecia una marcada actividad geodinámica conformada principalmente por movimientos de remoción de masas.

2.4.2. ORIGEN DEL YACIMIENTO.

El yacimiento es de origen sedimentario con edades del Jurásico superior al Cuaternario reciente, fuertemente plegadas y falladas, constituidas por las formaciones Chicama, Chimú y Santa-Carhuaz.

⁴ Fuente: Neil, R. (2010) Plan de minado a tajo abierto proyecto Minaspampa para el estudio de factibilidad

2.4.3. ESTRATIGRAFÍA⁵

2.4.3.1. FORMACION CHICAMA (JURASICO SUPERIOR)

Es una formación de la serie sedimentaria de Jurasico Superior, dicha formación se encuentra infra yaciendo la formación Chimú. Dicha formación aflora en el valle de Chicama provincia de Trujillo departamento de La Libertad Su espesor es de +/-1000m. Litología consiste de lutitas negras laminares y deleznales con intercalaciones de areniscas grises, cuarcitas y limonitas. Figura 2

2.4.3.2. GRUPO GOYLLARISQUIZGA (CRETACICO INFERIOR)

2.4.3.2.1. FORMACION CHIMU

Lo que caracteriza a esta formación son las areniscas cuarzosas sus afloramientos más accidentales se encuentran al NNO de Paria Coto (Huaral) donde han sido cortados por intrusiones del batolito de la Costa.

Su contacto en el sector oriental es concordante sobre la formación Oyon (Chicama) e infrayace a la Formación Santa.

La Formación Chimú destaca su morfología conspicua y coloración blanquecina o blanco rojiza que en conjunto se observa algo rojizo claro, destacando las capas de arenisca resistente a la erosión. Litología, estratos comunes de areniscos cuarzosos y macizos en capas de 1 a 3 m. contiene

⁵ Fuente: Neill, R. (2010) Plan de minado a tajo abierto proyecto Minaspampa para el estudio de factibilidad

lutitas y mantos de carbón, con una potencia que varía entre 600 m (Figura 2).

2.4.3.2.2. FORMACION CARHUAZ

Así como las otras unidades que conforman el grupo Goyllorizquizga se ubican en las cuencas Chavin, Santa y parte de la cuenca Huarmey.

Su afloramiento más notorio se ubica al Este de la Cordillera Blanca, donde ocurren formando el núcleo de sinclinales.

En algunos lugares como Conococha se observan areniscos ferruginosos algo friable de grano fino en capa de 10m. De grosor, separados por limo líticos lajosos Litología, Consiste principalmente de limo arcillitas de color gris a verde con pequeñas capas de yeso en la parte inferior y en los niveles superiores limo arcillitas rojizas. Tiene una potencia de 1500m. Figura 2

2.4.3.2.3. FORMACION CHULEC

Es una secuencia bastante fosilífera de calizas arenosas lutitas calcareas y margas las que por un interperismo adquieren un color crema amarillento su grosor es aproximadamente de 300 a 350metros, su edad corresponde desde el albiano inferior a albiano medio.ver (Figura 2).

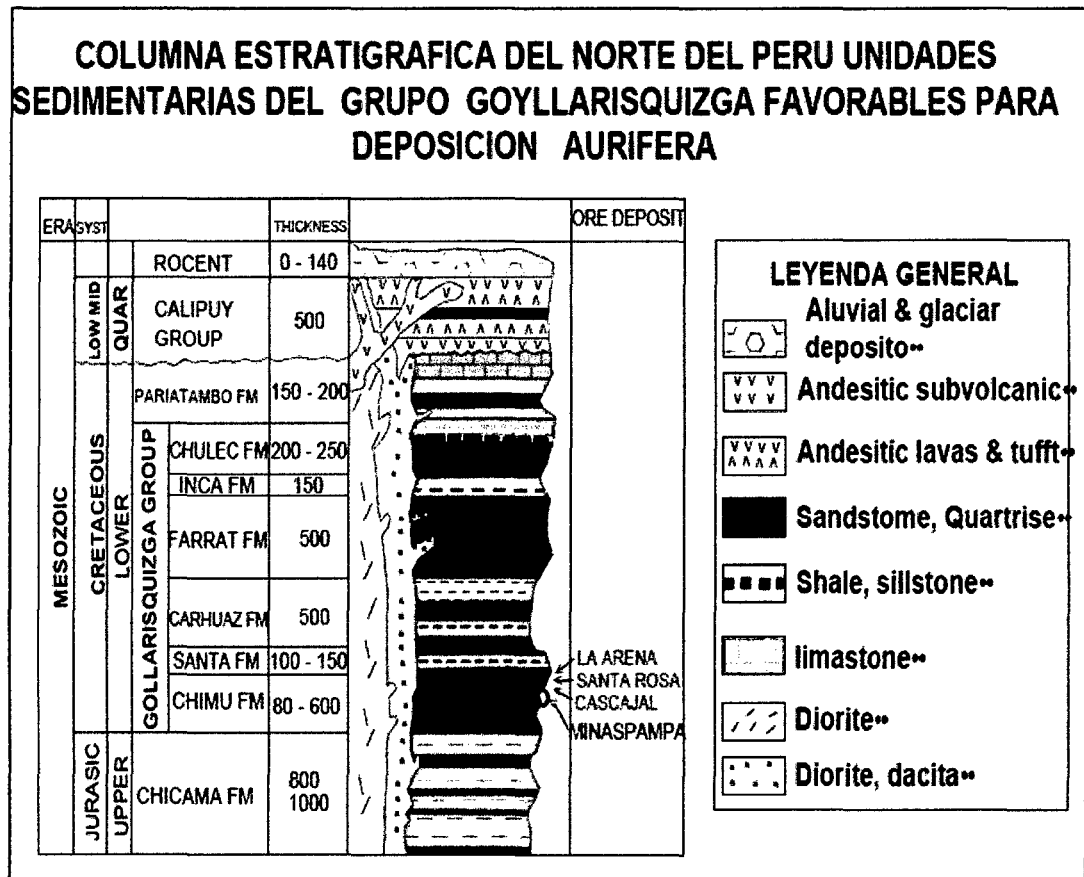


Figura 2: Columna Estratigráfica del norte Perú

2.4.4. GEOLOGÍA LOCAL.⁶

Geológicamente la mineralización se encuentra emplazada dentro de las areniscas de la formación Chimú de rumbo N30-50W con potencia mayor a 200 m. y corresponde al trend de mineralización aurífera del metalotecto septentrional andino del Norte del Perú, donde se encuentran operando minas como Lagunas Norte, Comarsa, La Virgen, el Toro, Igor, Algamarca.

La mineralización principal se encuentra asociada a afloramientos de brechas hidrotermales que se emplazan en el eje de un anticlinal de falla Normal, rumbo

⁶ Fuente: Vector Perú (2011) Ingeniería de detalle pad de lixiviación fase 1, pozas y botadero de desmonte Minasampa.

N25- 45W y de alto ángulo; observándose hasta 3 estructuras mineralizadas de diferentes potencias y moderadamente especiadas que convergen desde el Sur Este hasta la parte central generando un importante halo de mineralización con potencia promedio visible de 2.9m. y valores de oro hasta de 20gr/tn. Tal como se comprueba con las fuertes explotación reciente mente efectuada mediante labores subterráneas. También existe un segundo sistema de mineralización relacionado a brechas hidrotermales de rumbo N30⁰-50°E, de alto ángulo con potencia menor a 20m. observándose presencia de oro de libre íntimamente asociado a OxFe (Óxido de Fe), destacando principalmente la goetita, limonita, jarosita, y ocasionalmente hematita. Colaterales a estos dos sistemas se presentan espacialmente delgadas estructuras mineralizadas tipo “stockwork”, incrementando significativamente las posibilidades de mineralización.

Los rasgos principales de la presencia de alteración hidrotermal está relacionada fuertemente al ensamble cuarzo-sericita, ocasionalmente cuarzo alunita Que se manifiestan tapizando la matriz y fracturas de la roca en forma pulverulenta y granular y a la fuerte silicificación que ocurre en forma masiva generando cuerpos irregulares y en venillas milimétricas de cuarzo lechoso que cruzan la matriz de la roca indicando la proximidad de ocurrencia de mineralización aurífera .La alteración argílica se manifiesta en las intercalaciones de lutitas con areniscas de grano fino y textura fiable.

2.4.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.

El área de estudio forma parte del flanco este de un gran anticlinal afectado por lineamientos regionales de tendencia andina donde aflora la formación Chimú, cuyo eje pasa por los centros poblados de Casgabamba y Chir Chir. En este flanco se encuentran alineado el proyecto Minaspampa al Sur y corresponden al mismo segmento mineralizado, controlado por fallas de alto ángulo con rumbo promedio Este – Oeste.

Los trabajos de campo confirman fuertemente la existencia de dos sistemas principales de mineralización (1º) sistema Norte-Oeste y Sur-Este y (2º) sistema de rumbo Nor-Este y Sur-Oeste y persisten a profundidad incrementando el potencial del recurso mineralizado. El primer sistema probablemente corresponde esfuerzos de compresión y el segundo sistema a esfuerzos distensión. Estos juegos de estructuras posiblemente constituyen un sistema de Feeders por donde han ascendido las soluciones hidrotermales que han mineralizado el área.

La mineralización se presenta asociada a un sistema de estructuras de OxFe de rumbo promedio E–W, de alto ángulo donde se expone el contacto de brechas hidrotermales que tienen un comportamiento tipo rosario en forma vertical y también horizontal con potencias de hasta 5m en la parte central, estrangulándose hasta un espesor en centímetros en su parte angosta (Cº Minaspampa).

El contacto de la brecha hidrotermal con la roca encajonante ha generado una aureola de alteración y mineralización con valores de oro, cuyo resultado es la

presencia de un sistema de venillas tipo stockwork con relleno de OxFe, además se observa en la matriz de la roca, oquedades cúbicas rellenas con OxFe tipo boxwork, producto de la intensa lixiviación hidrotermal de la pirita, dando la apariencia de Vuggy – Silica por la abundante ocurrencia de estas cavidades. También se presenta “dikes” de brecha hidrotermal con fuerte oxidación pero de menor potenc

2.4.6. GEOLOGÍA ECONÓMICA.⁷

En los alrededores del area de estudio, Hacia el SE destaca el yacimiento metálico de mediana escala denominado Minaspampa, La mineralización aurífera , asociadas a estructuras de Brechas Hidrotermal con potencia promedio hasta 2,9m., conformada por clastos heterogéneos de cuarcita y matriz de granos de cuarzo con OxFe, destacando principalmente la goetita, jarosita y limonita con contenido de plata-oro.

Los fluidos hidrotermales produjeron rellenos de fracturas que permitió la movilización de iones de plata, oro, plomo y hierro con minerales de sulfuros: galena, pirita y óxidos como: goetita, hematina, pirolusita.

2.5. BASE DE DATOS⁸

Para la estimación de los recursos de oro y plata de Minaspampa se han empleados las leyes obtenidas de la perforación de 81 taladros RCD⁹, muestreo en labores

⁷ Fuente: Vector Perú (2011) Ingeniería de detalle pad de lixiviación fase 1, pozas y botadero de desmonte Minaspampa.

⁸ Fuente: Linares F.(2011) Proyecto Minaspampa informe estimación de recursos

⁹ Rotating control device

subterráneas y las leyes de las trincheras y calicatas en superficie. En total se emplearon 11478 muestras distribuidas en sus respectivas tablas de la siguiente manera (Tabla 2).

Tipo de muestra	Cantidad	Porcentaje	Tabla-Access	Observaciones
RCD	8 814	76,8 %	DrillHoleA	81 Taladros
Calicatas	157	1,4 %	Calicatas	Pozos superficiales
Trincheras	2 179	19,0 %	Trincheras	Superficie
Canales	301	2,6 %	Undergroud	Subterránea
Sin recuperación	27	0,2 %	DrillHoleA	----
Total	11 478	100,0 %		

Tabla 2: Tipo y número de muestras utilizadas en la estimación

2.6. TOPOGRAFÍA

La base de datos topográfica incluye la información de los collares de los 81 taladros RCD, el levantamiento topográfico de las trincheras y calicatas en superficie y el levantamiento de las labores subterráneas con sus respectivos canales. Ver anexo figura 3 para la ubicación de los taladros y ver anexo figura 4 para la superficie topográfica.

2.7. PERFORACIÓN RCD

Hasta abril del 2010 se han perforado 87 taladros RCD, de estos sólo 81 taladros han sido usados en la presente estimación, totalizando

12 694,50 m perforados en Minaspampa. La mayoría de los taladros tienen inclinaciones de -65° y -70° por debajo de la horizontal y azimuts de 205° y 25° con el objetivo de interceptar las zonas mineralizadas con oro y plata.

El espaciamiento entre taladros es de aproximadamente 40 m y han cubierto un área superficial de 860 m de NW a SE y de 450 m de SW a NE, con profundidades que tienen en promedio 150 m, ver anexo Figura 1

2.8. INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA

Para la interpretación geológica, fue subdividido en dominios geológicos y codificados numérica y alfabéticamente. La tabla 3 contiene los dominios geológicos, las densidades y los códigos usados para la interpretación geológica del proyecto Minaspampa.

Lithology	Rock Code	Numeric Code	Density	Rock Type	Colour
Aire	AIRE	0	0	Air	white
Mineral	ORE	10	2,54	Ore	Red
Plata mineral	ORE_AG	11	2,54	Ore	Light Blue
Mat. Esteril	WASTE	99	2,54	Waste	Blue
Cuarcita grano fino	CZT1	101	2,54	Ore	Sea Green
Cuarcita grano medio	CZT2	102	2,54	Ore	Light Green
Cuarcita grano Grueso	CZT3	103	2,54	Ore	
Arenisca fino	ARE1	104	2,50	Ore	Yellow Green
Arenisca medio	ARE2	105	2,50	Ore	Yellow Green
Arenisca Grueso	ARE3	106	2,50	Ore	Yellow Green
Lutita	LUT	107	2,44	Ore	Cyan
Lutita Carbonosa	LUTC	108	2,40	Ore	
Brecha Hidrotermal	BXH	109	2,30	Ore	Red
Brecha Tectonica	BXT	110	2,50	Ore	Blue
Coluvial	COL	113	1,80	Ore	White
Relaves	REL	114	1,78	Ore	Grey
Gouge, relleno de Falla	GG	115	2,50	Ore	Blue
Intercalaciones (lut+are+czt)	INTC	120	2,45	Ore	Light Cyan

Tabla 3: Listado de los códigos geológicos y densidades para el modelamiento geológico

CLASIFICACIÓN DEL RECURSO METÁLICO

LINAMEC¹⁰ ha definido la clasificación de los recursos en base al alcance obtenido en los variogramas y en el número de muestras que intervienen para la asignación de los valores de oro y plata a los bloques. La tabla 4 contiene los parámetros usados para la clasificación de los recursos del Proyecto Minaspampa.

RECURSO	RADIO DE BÚSQUEDA	NÚMERO DE MUESTRAS
MEDIDO	60	3
INDICADO	75	2
INFERIDO	90	1

Tabla 4: Parámetros usados para la clasificación de los recursos

¹⁰ Linares Americas Consulting SAC.

Para la clasificación de los recursos se realizaron tres pasadas durante la interpolación incrementando el elipsoide de búsqueda. Antes del proceso de interpolación, los códigos litológicos, se agruparon en dos dominios ORE y CZT2. El dominio ORE agrupa a los códigos relacionados con la mineralización y el dominio CZT2 agrupan todos los códigos de rocas metamórficas y sedimentarias que albergan los cuerpos mineralizados. El modelo de bloques fue actualizado asignándoles el código de ORE a partir de los sólidos de mineral; se utilizaron contactos duro entre los dominios.

La Tabla 5 presenta los resultados de la estimación y clasificación de los recursos a diferentes leyes de corte con los contenidos de plata y de onzas equivalentes. Para calcular las onzas equivalentes se ha usado un precio para la onza troy de oro de US\$1200 y de US\$24 para la onza troy de plata, con estos valores se obtiene una relación de 1:50, dividiendo el total de las onzas troy de plata entre 50 se obtiene 206000onzas troy de oro equivalentes para el total de los recursos medidos, indicados e inferidos y 199000 onzas troy de oro equivalentes para los recursos medidos e indicados de la plata.

Total Recursos Au Minaspampa (Cutoff=0.10 g/t)					
Recurso	Volumen	Densidad	Tonelaje	Au_Tot	Au oz troy
MEDIDOS	5 389 749	2,54	13 695 353	0,265	116 520
INDICADOS	1 779 836	2,54	4 522 563	0,201	29 197
INFERIDOS	1 494 350	2,54	3 797 144	0,206	25 129
TOTAL	8 663 936	2,54	22 015 060	0,241	170 845

Recursos Au Minaspampa Medidos + Indicados (Cutoff=0.10 g/t)					
Recurso	Volumen	Densidad	Tonelaje	Au_Tot	Au oz troy
MEDIDOS	5 389 749	2,54	13 695 353	0,265	116 520
INDICADOS	1 779 836	2,54	4 522 563	0,201	29 197
TOTAL	7 169 585	2,54	18 217 916	0,249	145 717

Total Recursos Ag Minaspampa (Cutoff=5.00 g/t)					
Recurso	Volumen	Densidad	Tonelaje	Ag_Tot	Au oz troy
MEDIDOS	6 653 011	2,54	16 905 300	15,683	8 523 836
INDICADOS	1 113 337	2,54	2 828 990	15,663	1 424 587
INFERIDOS	487 724	2,54	1 239 307	9,283	369 876
TOTAL	8 254 072	2,54	20 973 597	15,302	10 318 876

Recursos Ag Minaspampa Medidos + Indicados (Cutoff=5.00 g/t)					
Recurso	Volumen	Densidad	Tonelaje	Ag_Tot	Au oz troy
MEDIDOS	6 653 011	2,54	16 905 300	15,683	8 523 836
INDICADOS	1 113 337	2,54	2 828 990	15,663	1 424 587
TOTAL	7 766 348	2,54	19 734 290	15,680	9 948 423

Tabla 5: Inventario de los recursos estimados del proyecto Minaspampa

La figura 5: ver anexo representación isométrica del modelo de bloques mostrando la categorización de los recursos del Proyecto Minaspampa.

En la figura 6 ver anexo puede apreciarse la distribución de las leyes de oro en el modelo de bloques del proyecto Minaspampa luego de la interpolación.

2.9. ANTECEDENTES DE LA PLANIFICACIÓN MINERA

2.9.1. LA PLANIFICACIÓN MINERA

Las empresas mineras desde hace ya más de un siglo están obligadas a presentar a la administración un proyecto de la explotación a realizar, previo a la obtención de la concesión final de explotación y, posteriormente un plan de labores anuales, que permite ejercer control por parte de los directivos de la compañía y por parte del estado, que es el propietario de las riquezas en el subsuelo.(Bustillo Revuelta & Lopez Jimeno, 1997).

La planificación minera es aquella actividad de la Ingeniería de minas que define el proceso mediante el cual se transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo para el accionista (Rubio, 2008)

La planificación minera busca conjugar y activar las fuentes de renta con que cuenta el negocio minero tales como el tamaño, la ley, la ubicación y las características generales del recurso geológico, las condiciones operacionales y de gestión, el poder de mercado, entre otras respetando las restricciones impuestas por el mercado y el entorno para definir una promesa productiva en el tiempo que permita maximizar la renta económica del activo, debe buscarse que la planificación minera sea coherente con los objetivos estratégicos de la empresa, también debe ser sistémica, es decir, que incorpore las diferentes áreas de la ingeniería, geología, finanzas, entre otras, y dinámica en el análisis de las condiciones que afectan el desarrollo y operación de la mina.

A continuación en la figura 7 se muestra un esquema con las diferentes etapas de planificación, desde la ubicación del cuerpo mineralizado hasta el programa de producción.

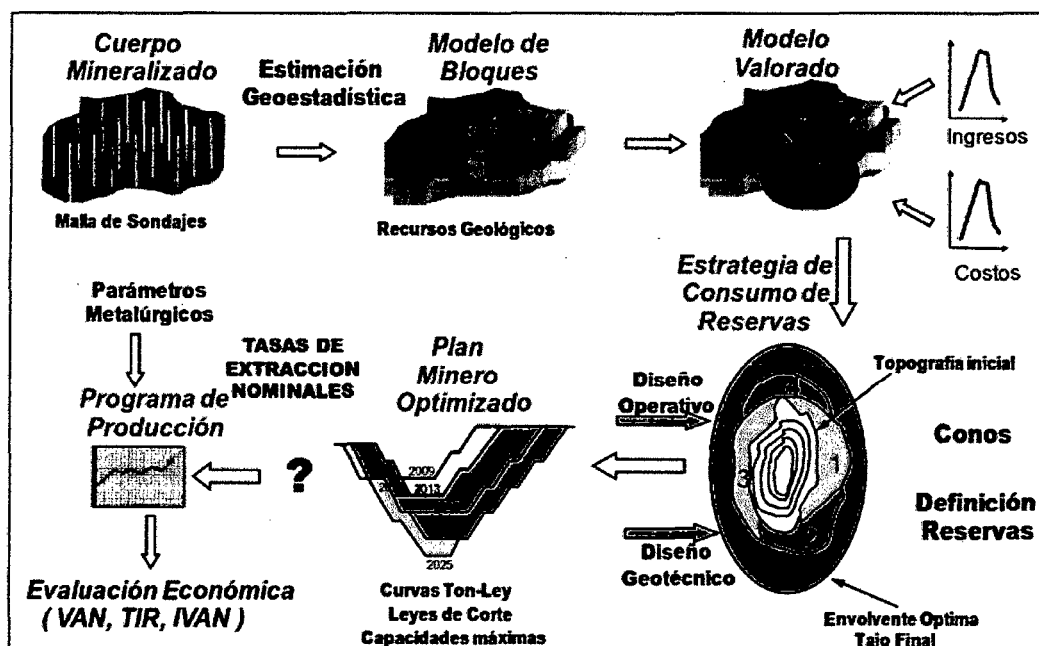


Figura 7: Proceso de planificación

Fuente: Galo Muños L. (2012) Modelos de costo para la valorización de planes mineros

La planificación minera se puede clasificar en:

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA

Simulaciones para determinar la incertidumbre en el beneficio generado por un proyecto. Busca tomar las condiciones del mercado, del recurso económico y los objetivos de los inversionistas, alineando la guía en la toma de decisiones con las condiciones mencionadas.¹¹ (Fernando Andrés, 2011).

¹¹Fernando, P. (2011) Definición de pit final capacitado bajo incertidumbre

En la figura 8 se muestra las principales funciones de este tipo de planificación y existen 5 funciones principales de la planificación estratégica.

- Reconocimiento constante del recurso mineral
- Método de extracción
- Ritmos de explotación
- Secuencia de producción
- Leyes de corte

Su principal objetivo es sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión del dueño.

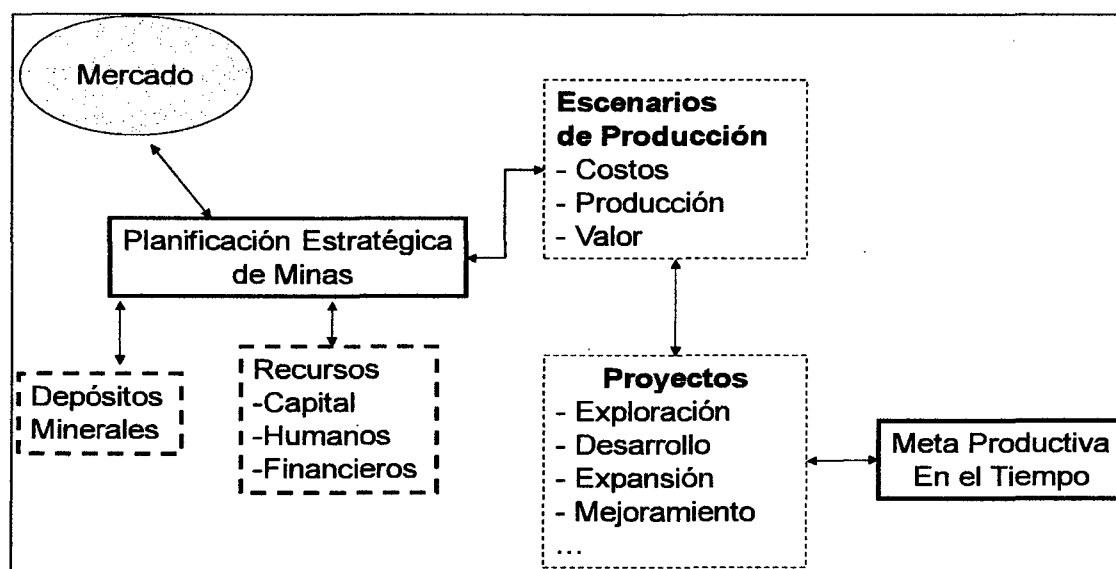


Figura 8: Planificación estratégica

Fuente: (Fredy Navarro Z. 2012) Planificación y Gestión Estratégica

PLANIFICACIÓN CONCEPTUAL

Es el proceso que analiza y ordena los recursos existentes para conducir a la meta productiva definida como parte de la planificación estratégica. (Fernando Andrés, 2011)

En la figura 9 presenta el porcentaje de certeza para cada etapa, generalmente la planificación conceptual de minas se enmarca dentro de los proyectos. Define el envolvente económica, el diseño conceptual, el programa de producción y la evaluación económica conducentes a la elaboración de un plan minero.

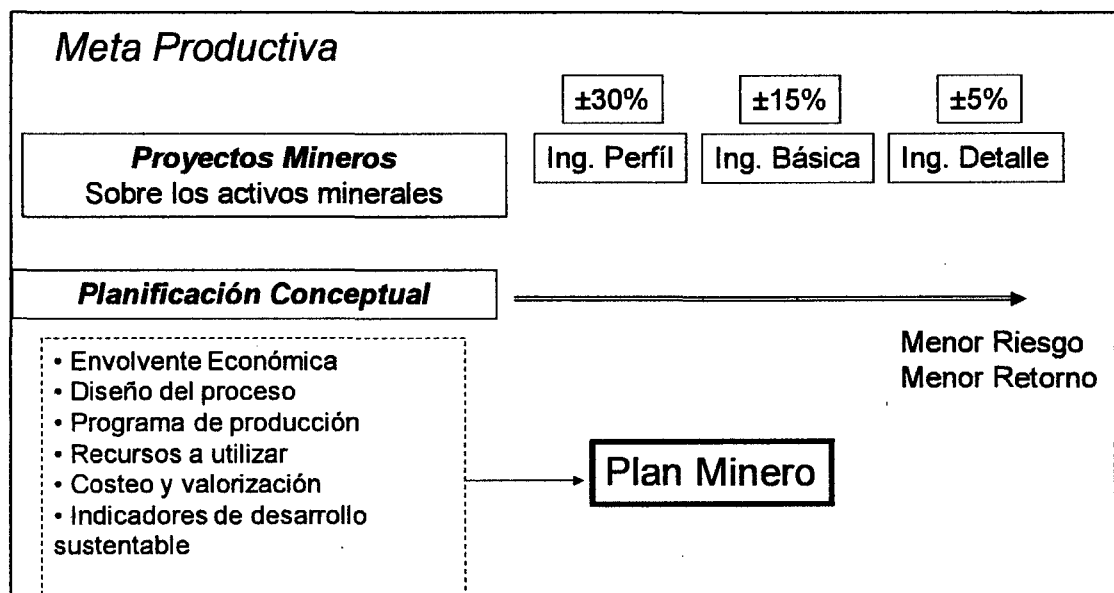


Figura 9: La planificación Minera y los proyectos

Fuente: (Gallardo Guerrero G. 2012) Planificación minera avanzada.

PLAN MINERO

Define cuándo y cómo se extraerán los recursos en cada uno de los periodos del negocio minero. Se cuantifican los recursos humanos y materiales a utilizar, representa el plan de negocios de la compañía, un ejemplo es de la planificación interna mostrada en la figura 10.

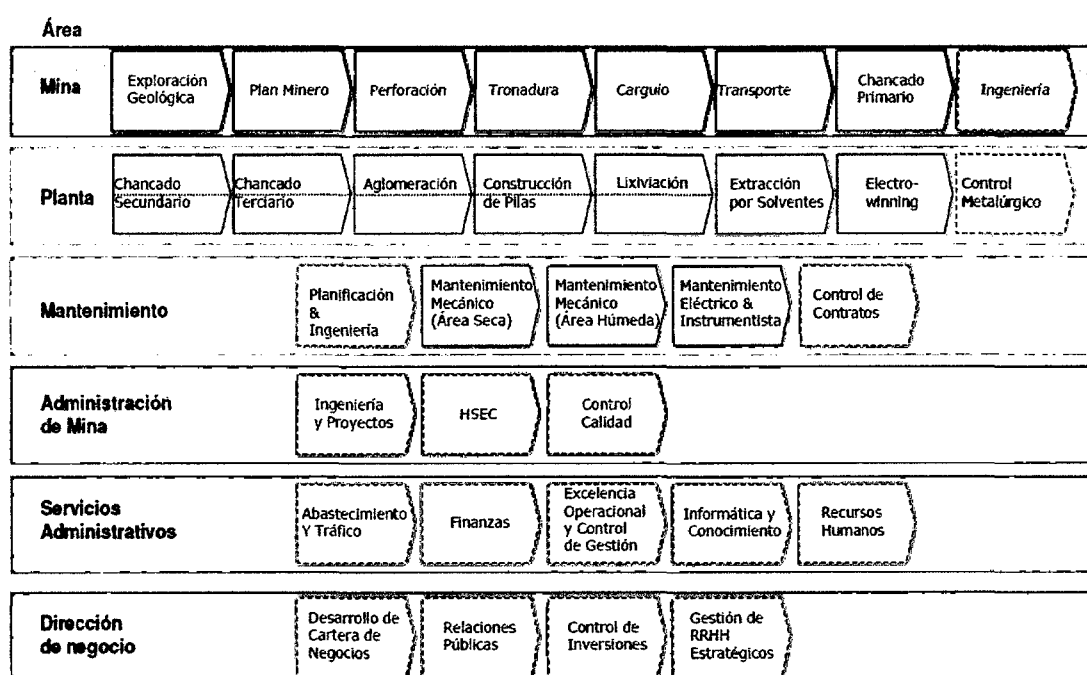


Figura 10: Planificación minera interna

Fuente: (Fredy Navarro Z. 2012) Planificación y Gestión Estratégica

PLANIFICACIÓN OPERATIVA

Cuando la mina es puesta en operación se realizan diversas actividades de optimización de equipos y procesos que conducen a la consecución del plan minero.

En esta etapa se produce retroalimentación hacia la planificación conceptual de modo de redefinir algunos conceptos del diseño y secuenciamiento que permitan alinearse con el plan minero.

El aporte de la planificación operativa al proceso de planificación es fundamental desde el punto de vista de la definición de indicadores operacionales

Desde el punto de vista de los horizontes de planificación (figura 11), se puede definir una diferenciación en tres alcances:

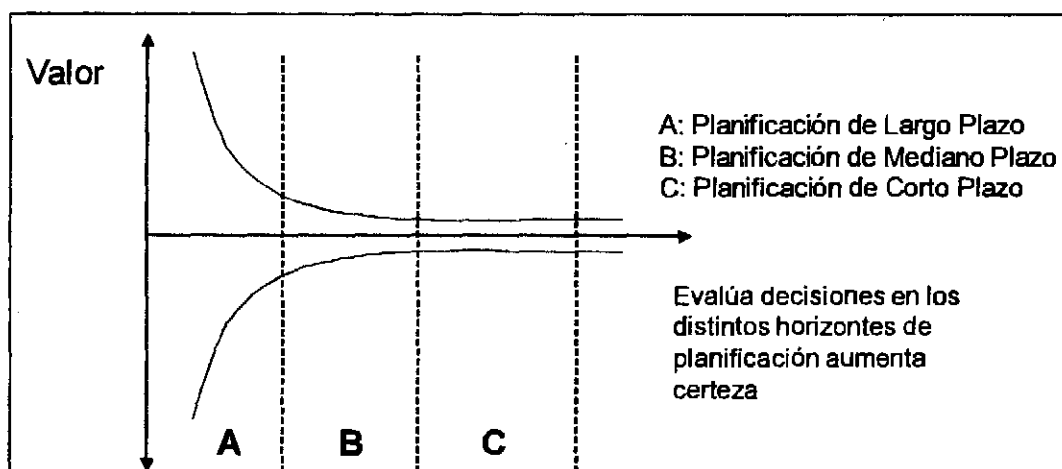


Figura 11: Horizontes de planificación y agregación de valor

Fuente: (Gallardo Guerrero G. 2012) Planificación minera avanzada

a) PLANIFICACIÓN DE LARGO PLAZO

Define el tamaño, vida de la mina, y las reservas mineras. Corresponden el cálculo de envolvente económica. El o los métodos de explotación, los ritmos de explotación a lo largo de la vida de la mina, la secuencia de extracción y el perfil

de leyes de corte. Se debe incorporar alternativas con diferentes situaciones y variación de parámetros, evalúa el negocio minero con diferentes niveles de riesgo, reportando la mayor cantidad de información a los inversionistas.

b) PLANIFICACIÓN DE MEDIANO PLAZO

Se encarga de adaptar los modelos que sustentan la planificación de largo plazo, generando planes de producción que permiten conducir la operación a las metas de producción definidas en el largo plazo. El resultado obtenido en este horizonte, permite adaptar la definición de negocios de la mina.

c) PLANIFICACIÓN DE CORTO PLAZO

Se encarga de la recopilación y utilización de la información operacional de modo de retroalimentar la planificación de mediano plazo. Además, se analizan los recursos utilizados en la operación de la mina y se definen indicadores de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación.

2.9.2. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

Los diferentes algoritmos existentes para llevar a cabo la optimización se pueden agrupar en dos categorías (Annels, 1991):

-
- Heurísticos: la experiencia demuestra que funcionan satisfactoriamente, aunque no poseen demostraciones matemáticas que permitan asegurar su validez. Es el caso del Cono Flotante.

 - Riguroso: Aquellos cuya optimización tiene una completa demostración matemática. El más característico y conocido es el método de Lerchs Grossmann. (Bustillo Revuelta & Lopez Jimeno, 1997)

2.9.3. MÉTODO DEL CONO FLOTANTE

Consiste en el estudio económico de los bloques mineralizados y estériles que caen dentro de un cono invertido, el cual se mueve sistemáticamente a través de una matriz de bloques, con el vértice del cono ocupando, sucesivamente, los centros de los bloques. La premisa básica de trabajo es que los beneficios netos obtenidos por explotar la mineralización que se encuentra dentro del cono deben superar los gastos de extraer el estéril existente en dicho cono. Los conos, individualmente, pueden no ser económicos, pero, cuando dos o más conos se superponen, existe una parte importante de estéril que es compartida por los diversos conos, lo que genera un cambio en sus estatus económicos.

La variabilidad económica del cono se calcula utilizando la fórmula:

$$B = (Pr \cdot RM \cdot G \cdot NB - (Mm + P) \cdot NB - (Me \cdot NE)) \cdot VB \cdot DA$$

Dónde:

B: Beneficio

Pr: Precio de venta del metal.

RM: Recuperación metalúrgica

G: ley media

NB: Numero de bloques con G como ley media

Mm: Costo de extraer y transportar cada tonelada de mineral.

P: Costo de procesar cada tonelada de mineralización

Me: Costo de extraer y transportar cada tonelada de estéril

NE: Numero de bloques de estéril

VB: Volumen del bloque

DA: Densidad aparente

Si el beneficio es positivo, todos los bloques incluidos dentro del cono se marcan y se quitan de la matriz de bloques, con lo que se crea una nueva superficie.

Si el beneficio es negativo, la matriz se queda como esta y el vértice del cono se traslada al segundo bloque cuyo valor está por encima de la ley mínima de explotación, repitiéndose el proceso. (Bustillo Revuelta & Lopez Jimeno, 1997)

2.9.4. MÉTODO DE LERCHS Y GROSSMAN

El método de trabajo del algoritmo de Lerchs y Grossman 3-D considera los valores económicos de los bloques y el concepto de arco estructural. Un arco estructural de un bloque A un bloque B significa que, si se quiere extraer el bloque

A, es necesario extraer previamente el B. para dejar al descubierto el A. aunque no necesariamente viceversa. Estos dos conceptos permiten obtener el valor más alto de la explotación, económicamente hablando con lo se define el diseño óptimo de tajo no pudiendo existir otro diseño que produzca un valor mayor.

El método toma en cuenta dos tipos de información. La primera está relacionada con la pendiente de los taludes de explotación. Dato imprescindible para poder establecer los correspondientes arcos estructurales, pues no es lo mismo un talud de 45° que genera tres arcos estructurales para la extracción de cada bloque (si este es de carácter cúbico), que un talud de 30° , que necesitaría, para su extracción, un número mayor de bloques y, por tanto, de arcos estructurales.

El segundo tipo de información consiste en el valor económico del bloque. Si es estéril, este valor será negativo (costo del arranque, carga y transporte a la escombrera), mientras que si un bloque mineralizado tendrá un valor positivo. fruto del valor de la mineralización menos los costos del tratamiento. Por último, los bloques situados en el aire poseerán un valor cero. Es importante tener en cuenta este tipo de bloques, pues puede suceder que, entre bloques de mineral, el arco estructural tenga que pasar por bloques de aire.

En el ejemplo 1 Obtención de tajo final con el algoritmo de Lerchs-Grossmann se muestran, en dos dimensiones, el progreso de las ramas para optimizar el diseño de la explotación que se llevaría a cabo para extraer los bloques cuyo valor se representan (Alford y Whittle, 1986).

Ejemplo simple

- Talud 45°
- Ejemplo 2-D
- Bloques Cúbicos
- El principio es el mismo para el algoritmo 3-D

Ilustración ejemplo 1, determinación del límite económico óptimo

Inicio

				23,9			6,9				23,9					

Modelo de bloques 2-D. De los cuales sólo 3 bloques contienen mineral y su valorización se destaca en color amarillo.

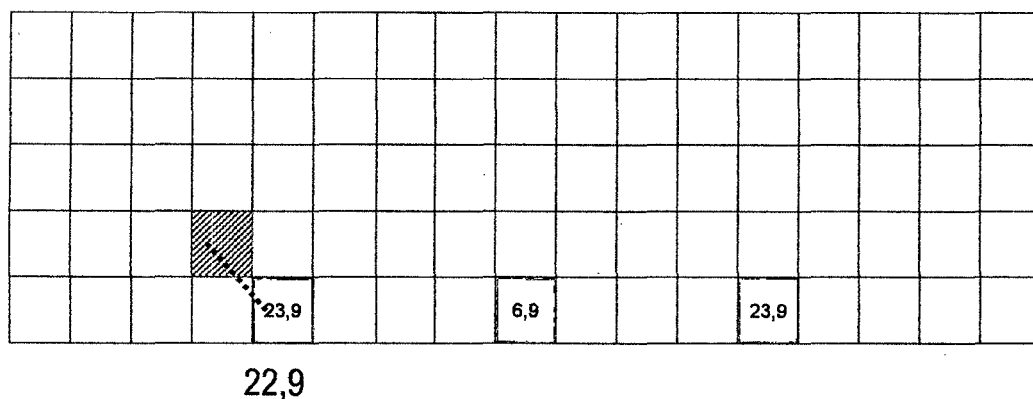
El resto de los bloques son desmonte y tienen un valor de - 1.0

Paso 1

				23,9			6,9				23,9					

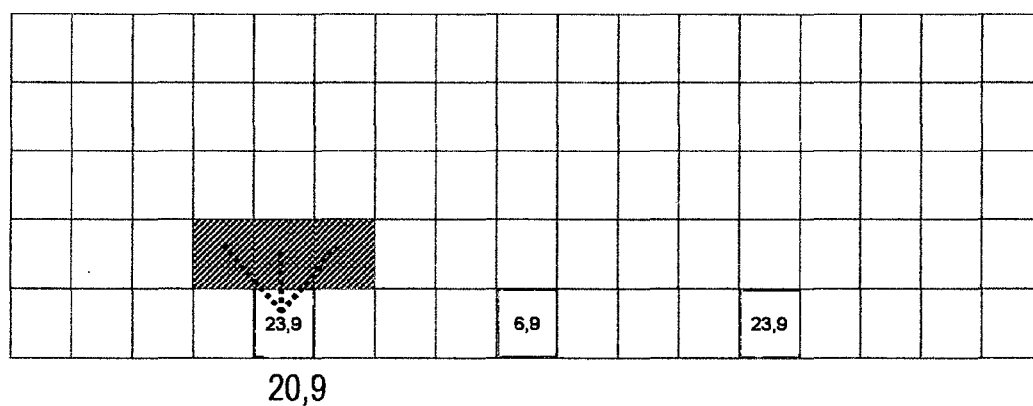
En el proceso de la optimización esos bloques puede ser enlazados a un grupo (Estos grupos son llamados ramas) de bloques y la vez pueden activarse o apagarse muchas veces.

Paso 2



Enlazamos los dos bloques para generar un arco¹². El valor total de la rama de los dos bloques es 22,9, por lo tanto ambos bloques generan beneficio económico al ser minados, señalado por medio de una bandera.

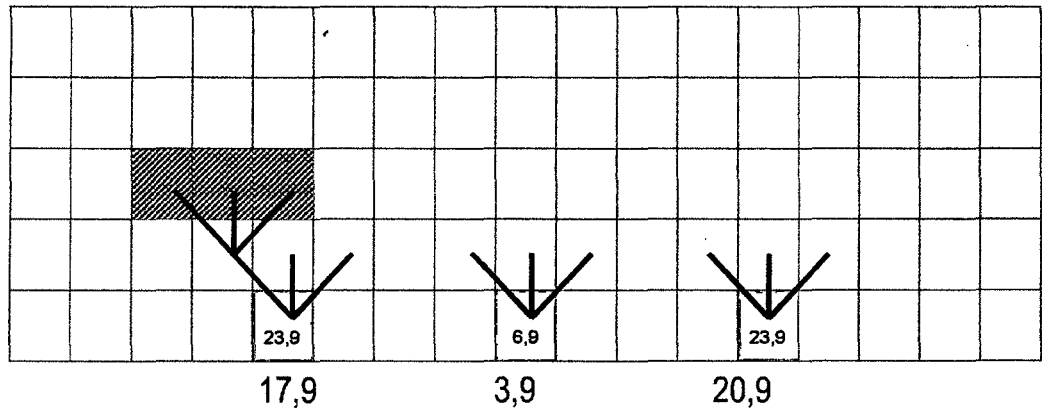
Paso 3



¹² Es una relación entre dos bloques

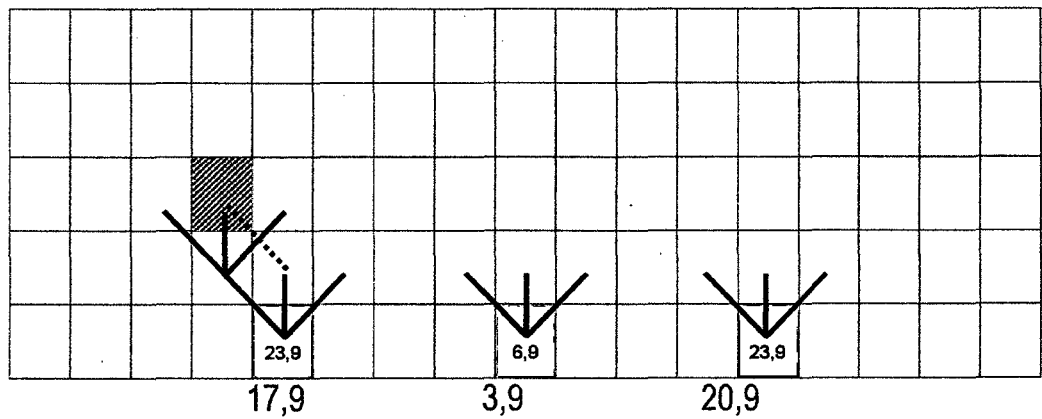
Se generan otros dos arcos desde el mismo bloque anterior. El valor total de la rama que une a los cuatro bloques es 20,9

Paso 4



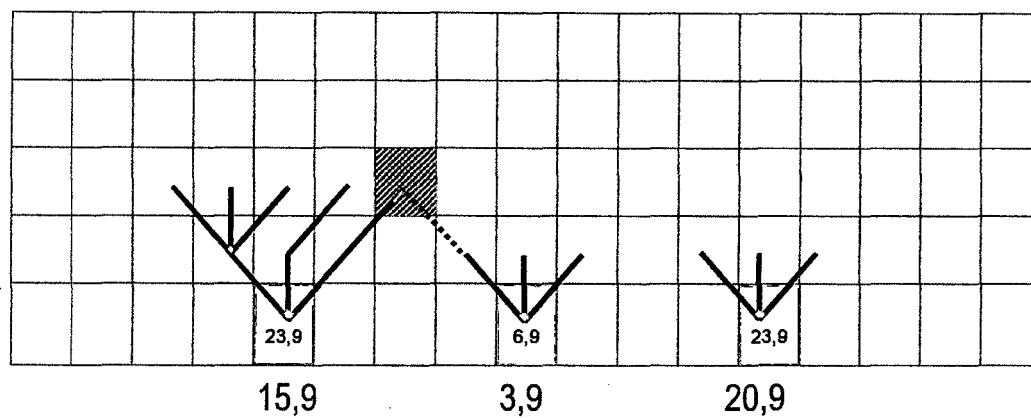
Se procede, a enlazar los bloques mineralizados restantes con los bloques del banco superior.

Paso 5



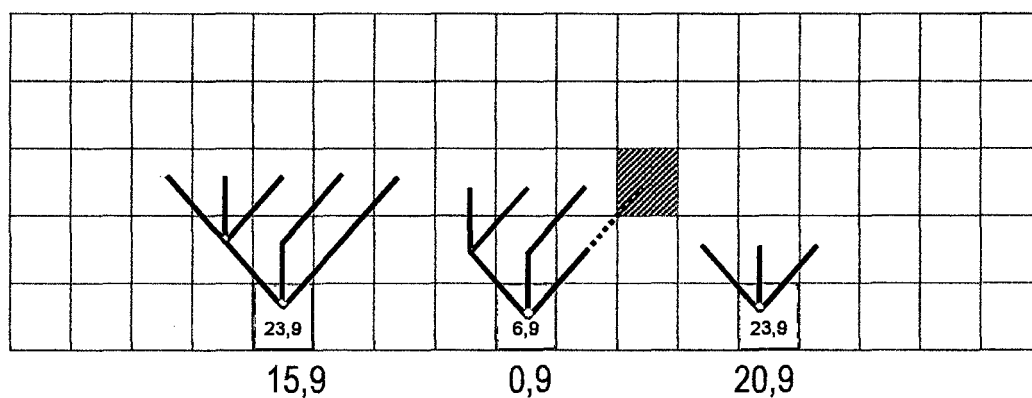
En el siguiente paso, se genera un arco a un bloque que ya fue ligado. El algoritmo de Lerchs Grossmann no crea este nuevo arco.

Paso 6



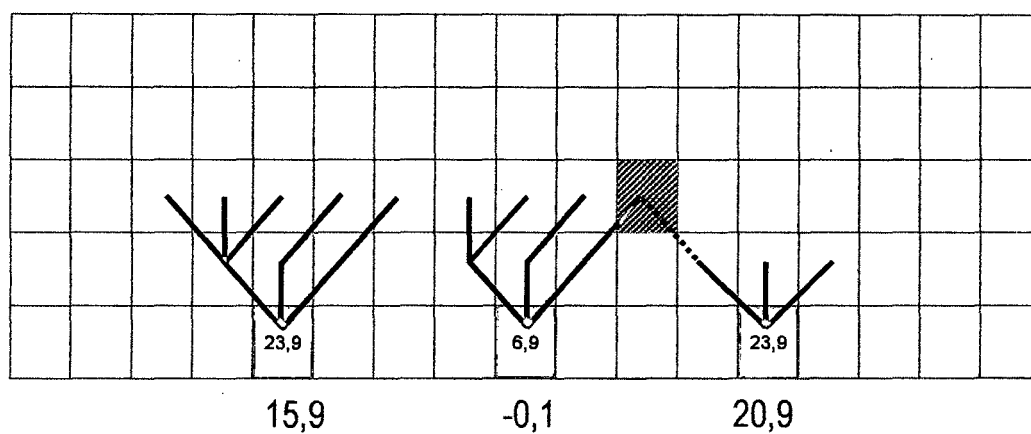
El arco siguiente del señalado por medio de una bandera a otro bloque señalado por medio de una bandera está entre dos ramas. El procedimiento es sin cambios no enlazamos.

Paso 7



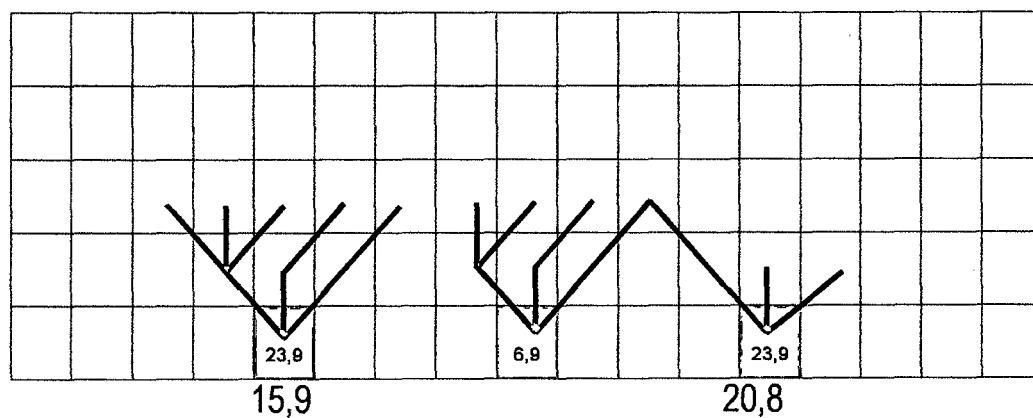
Continuamos enlazando bloque. El enlace punteado genera un valor de la rama de -0.1.

Paso 8



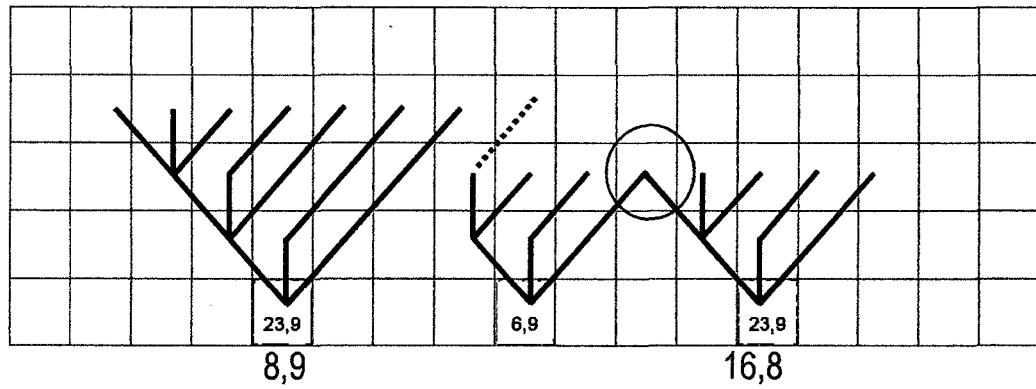
El próximo arco de interés proviene desde la rama ubicada a la derecha. Ambas ramas pueden cooperar para pagar el minado de los bloques en común.

Paso 9



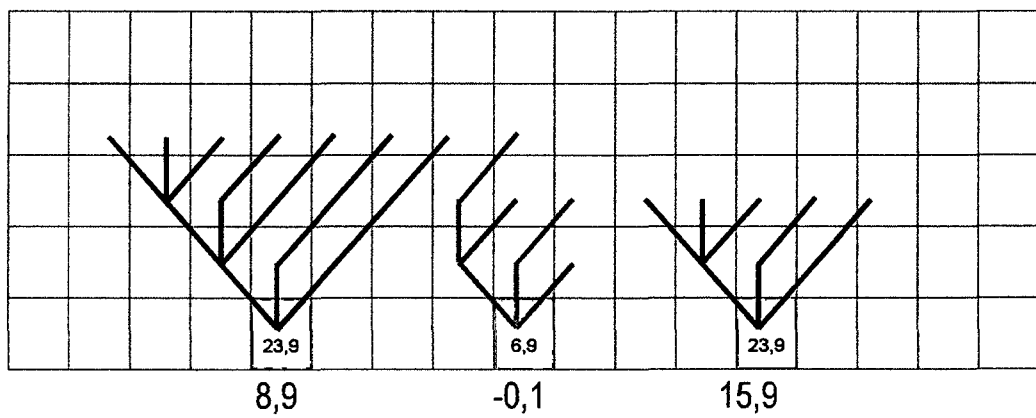
Lerchs-Grossman incluye un procedimiento para vincular dos ramas y trabajarlas como una sola, entregando solo un valor. Note que el valor de la rama de la derecha fue modificado.

Paso 10



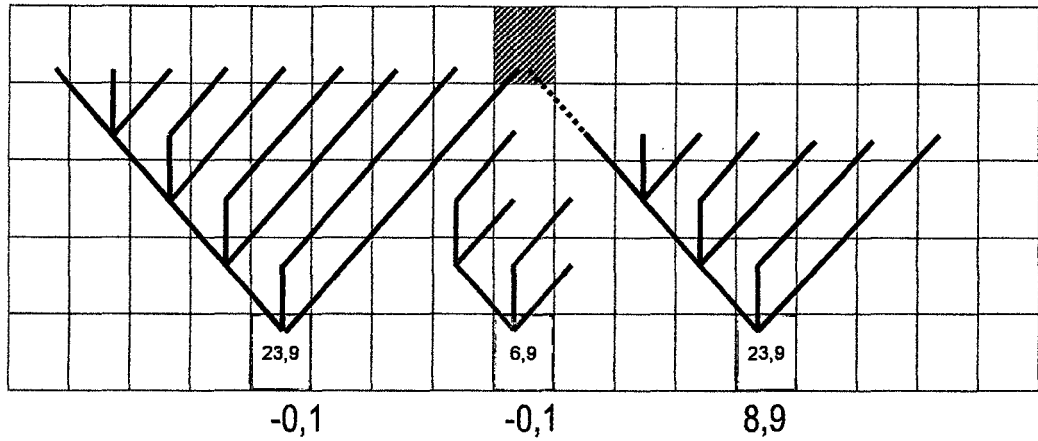
El algoritmo de Lerchs-Grossman detecta que remover el desmonte del bloque del círculo, puede ser removido por la rama derecha.

Paso 11



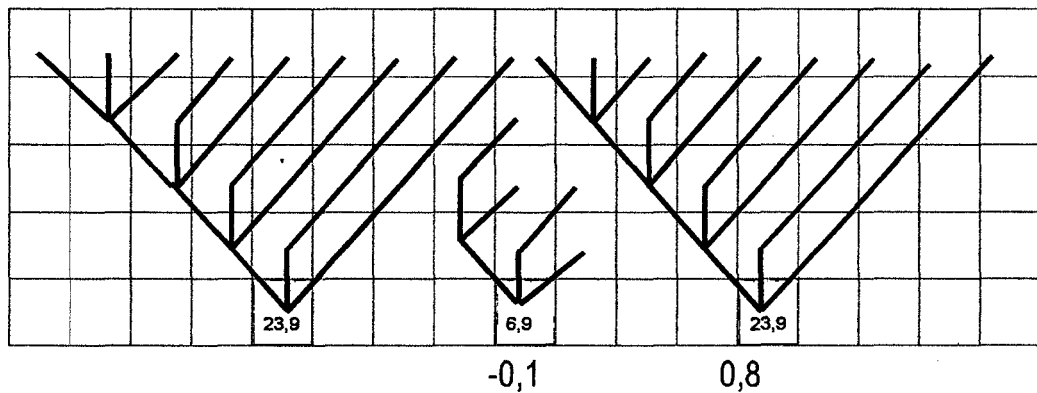
En el extremo de este tercer banco tenemos descargar la sub-rama central sobre el bloque de baja ley.

Paso 12



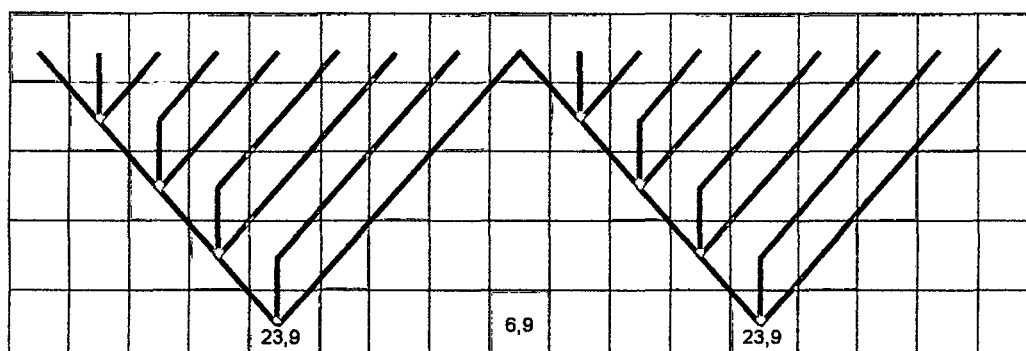
Se continúa enlazando y el valor total de la rama izquierda llega a ser eventual negativo. El próximo bloque esta nuevamente entre una rama negativa y otra positiva, en donde ambas ramas se combinan y generan un solo valor total.

Paso 13



El algoritmo Lerchs-Grossman escanea los arcos desde los bloques que tienen valor positivo y liga que bloques deben ser extraídos para lograr minar el bloque de interés. En este preciso momento la optimización concluye

Paso 14



Los bloques señalados de color amarillo constituyen el pit óptimo. La forma del pit vale 0,8. La rama del centro tiene un valor negativo por lo que estos bloques no serán minados.

El tajo final es definido como la “envolvente económica” tal que si todo el mineral y desmonte es extraído hoy, pudiese rendir la mayor utilidad operativa posible (en moneda no descontada / actualizada). Entre todas las técnicas disponibles para la determinación del tajo final, la del Algoritmo de Lerchs-Grossmann se acepta desde su postulación en 1965 como referencia para comparar los resultados de los demás métodos.

2.9.5. ENVOLVENTE ECONÓMICA

El problema de la envolvente económica puede ser definido como la determinación del tamaño y forma de un open pit¹³ al final de su vida tal que el valor máximo de un depósito mineral este realizado y los requerimientos de las pendientes de los taludes del pit estén satisfechos. Típicamente, el problema es maximizar la

¹³ Tajo abierto

diferencia entre el valor total de material a ser extraído y los costos totales de remoción de ese material y su capa superior. (Manuel Schellman, M.2000 Planificación de minas a cielo abierto).

2.9.6. SECUENCIAMIENTO

Discretización de la envolvente económica figura 12, Se aplica los mismos algoritmos que para la envolvente económica, variando parámetros de valoración, este aspecto es el relativo a la estructuración de la secuencia minera de explotación, con vistas a la búsqueda del máximo beneficio posible, la secuencia minera corresponde al orden el cual deseamos extraer el material.

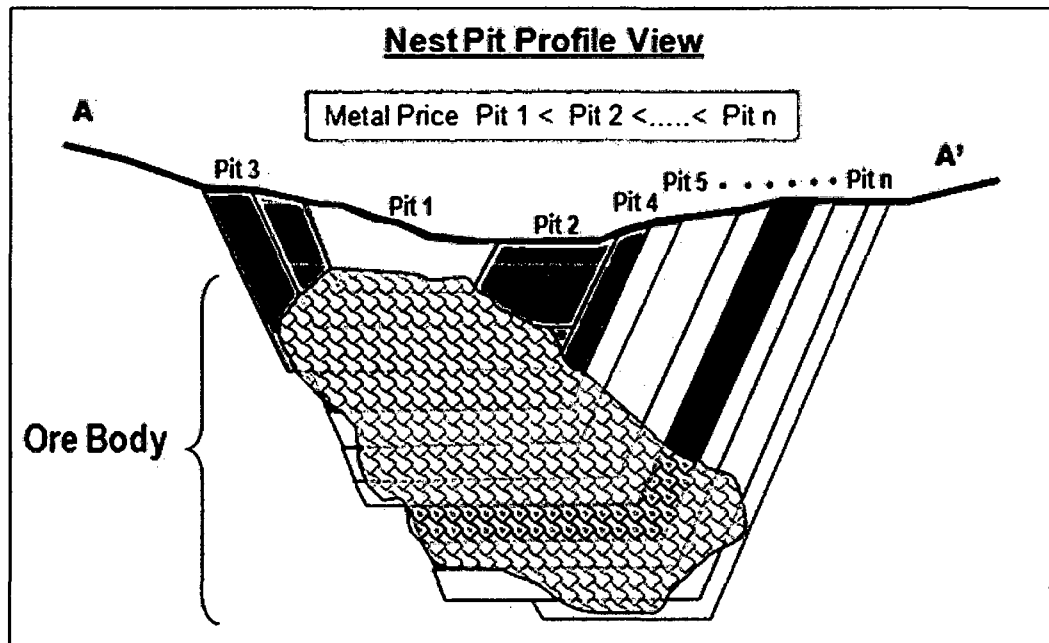


Figura 12: Esquema de pits óptimos generados por una secuencia de precios de productos.

Fuente: Curso básico 2009 Gemcom Whittle

La definición de fases corresponde a una geometría de pit que permite el adecuado funcionamiento de las operaciones unitarias y el conveniente posicionamiento y espacio para los equipos de carguío y transporte para llevar a cabo la explotación.

Generalmente se definen las fases como un subconjunto de pits calculados por el algoritmo de Lerchs-Grossman tal que entre fases consecutivas se tengan los anchos suficientes para el funcionamiento de los equipos y que permitan agendar la extracción del material de forma balanceada buscando dar una máxima utilización de los activos físicos (planta y equipos mina).

2.9.7. SELECCIÓN DE LA ADECUADA SECUENCIA DE EXPLOTACIÓN

Este aspecto es el relativo a la estructuración de la secuencia minera de explotación, con vistas a la búsqueda del máximo beneficio posible. El algoritmo de Milawa¹⁴ comúnmente utilizado para realizar el secuenciamiento y agendamiento de la producción en el tiempo todo esto a largo plazo, se basa en la definición de fases-bancos y la evaluación económica a priori de los bloques definiendo su calidad de mineral o estéril de acuerdo al beneficio económico atemporal y con esta evaluación se realiza el cálculo de las porciones de cada fase-banco que corresponden a estéril y aquellas que son mineral.

se ejecuta la rutina de agendamiento de estas porciones de acuerdo a una de dos funciones objetivos: Maximizar el VPN o realizar una maximización que incluya un suavizamiento de la geometría del programa de producción (llamada "milawa

¹⁴ Algoritmo de planificación minera que elabora un plan de largo plazo para la mina.

balance”), haciéndose cargo de restricción sobre los avances en cada fase, la interacción o desfase en bancos entre cada fase correlativa, las capacidades de extracción y procesamiento, y/u otras restricciones sobre la extracción o procesamiento de diferentes tipos de roca en los períodos a agendar. De esta manera, el resultado de este proceso es la construcción de un programa de producción en que cada período se extrae una porción del yacimiento con características de tonelaje y ley.

Roman (1974) describe un algoritmo que permite determinar la secuencia minera óptima. En la figura 13 se muestra una matriz de bloques, en la que el número superior indica la columna y fila de cada bloque y el inferior su valor económico.

1,1	2,1	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,1	13,1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	2	1	1	1	-1	-1	-1
1,2	2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2	13,2
-1	-1	-2	-2	-2	1	2	3	2	1	-2	-1	-1
1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3	11,3	12,3	13,3
-2	-1	-1	-1	2	4	5	3	2	1	-2	-2	-2
1,4	2,4	3,4	4,4	5,4	6,4	7,4	8,4	9,4	10,4	11,4	12,4	13,4
-4	-3	-2	-2	-2	1	3	4	2	-1	-1	-2	-6
1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5
-6	-6	-5	-5	-4	-5	2	3	-2	-2	-3	-4	-5
1,6	2,6	3,6	4,6	5,6	6,6	7,6	8,6	9,6	10,6	11,6	12,6	13,6
-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6

Block Number

1,1
3

 Block Value

Figura 13: Matriz de bloques con sus correspondientes valores económicos.

Fuente: Hustrulid W. & Kuchta M. (2006). "Open Pit Mine Planning & Design"

La primera restricción de la explotación que la pendiente no debe exceder el valor 1:1 en ningún punto. Aplicando, por ejemplo, el método del cono flotante se obtendría la optimización que se muestra en la Figura 14. Con la técnica que se

Opción 1: extracción del bloque (6,5) seguida por la extracción del bloque (7,6)

Opción 2: extracción del bloque (8,5) seguida por la extracción del bloque (7,6)

	2,1	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,1
	-1	-1	-1	-1	-1	2	1	1	1	-1	-1
		3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	
		-2	-2	-2	1	2	3	2	1	-2	
			4,3	5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3		
			-1	2	4	5	3	2	1		
				5,4	6,4	7,4	8,4	9,4			
				-2	1	3	4	2			
					6,5	7,5	8,5				
					-5	2	3				
						7,6					
						-6					

Block Number 7,6 Block Value -6

Figura 15: Sección del yacimiento incluyendo el triángulo que contiene el máximo tajo.

Fuente: Hustrulid W. & Kuchta M. (2006). "Open Pit Mine Planning & Design"

	2,1	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,1
		3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	
			4,3	5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3		
				5,4	6,4	7,4	8,4	9,4			
					6,5	7,5	8,5				
						7,6					
						36					

Block Number 7,6 Sequence Number 36

Figura 16: Bloques que deben ser extraídos antes de la explotación del bloque 36

Fuente: Hustrulid W. & Kuchta M. (2006). "Open Pit Mine Planning & Design"

En la unidad de tiempo 34 existen diferentes opciones, según el bloque que haya sido en la unidad 35. Si los bloques elegidos han sido el (6,5) y el (7,6), las posibilidades serán.

$$(1) (7,5) - (6,5) - (7,6)$$

$$(2) (8,5) - (6,5) - (7,6)$$

$$(3) (5,4) - (6,5) - (7,6)$$

Por el contrario si la selección fue (8,5) y (7,6), las opciones serán:

$$(1) (7,5) - (6,5) - (7,6)$$

$$(2) (8,5) - (6,5) - (7,6)$$

$$(3) (5,4) - (6,5) - (7,6)$$

Las secuencias (2) y (4) similares, pues los bloques extraídos son los mismos solo que en diferente orden. Por ello, se lleva a cabo una evaluación económica para desechar la opción menos interesante. Seleccionando una tasa de interés del 10% se tendría

$$\text{Secuencias (2): VAN} = \frac{\$3}{(1,10)^1} + \frac{-\$5}{(1,10)^2} + \frac{-\$6}{(1,10)^3} = -\$5,91$$

$$\text{Secuencias (4): VAN} = \frac{-\$5}{(1,10)^1} + \frac{\$3}{(1,10)^2} + \frac{-\$6}{(1,10)^3} = -\$6,57$$

De acuerdo a estos resultados. Las secuencia (4) se eliminarían. Quedando como útil la secuencia (2). El siguiente análisis de posibilidades. Eliminados las combinaciones duplicadas por el método seguido anteriormente, generaría:

(1) (8,5) – (7,5) – (7,6)

(2) (9,4) – (8,5) – (7,6)

(3) (7,5) – (5,4) – (7,6)

(4) (8,5) – (5,4) – (7,6)

(5) (4,3) – (5,4) – (7,6)

(6) (9,4) – (7,5) – (7,6)

(7) (10,3) – (9,4) – (7,6)

El proceso continuaría hasta que se incluyesen los 36 bloques, determinándose la secuencia óptima a través de los sucesivos análisis de los valores actuales netos, tal como se hizo anteriormente. En la figura 17 se muestra cómo quedaría la secuencia completa y en la figura 18 el diseño final del tajo de acuerdo con la secuencia considerada.

a. Block Number and Sequence

	2,1	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,1	
	31	26	17	10	7	1	2	3	5	13	21	
		3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2		
		32	27	18	11	8	4	6	14	22		
			4,3	5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3			
			33	28	19	12	9	15	23			
				5,4	6,4	7,4	8,4	9,4				
				34	29	20	16	24				
					6,5	7,5	8,5					
					35	30	25					
						7,6						
						36						

Block Number → 7,1
 Sequence Number → 1

b. Block Value and Sequence

	-1	-1	-1	-1	-1	2	1	1	1	-1	-1	
	31	26	17	10	7	1	2	3	5	13	21	
		-2	-2	-2	1	2	3	2	1	-2		
		32	27	18	11	8	4	6	14	22		
			-1	2	4	5	3	2	1			
			33	28	19	12	9	15	23			
				-2	1	3	4	2				
				34	29	20	16	24				
					-5	2	3					
					35	30	25					
						-6						
						36						

Block Value → 2
 Sequence Number → 1

Figura 17: Secuencia de extracción óptima para el ejemplo de la figura 13

Fuente: Hustrulid W. & Kuchta M. (2006). "Open Pit Mine Planning & Design"

Si se calculase el valor actual neto para la secuencia definida, si se obtendría un valor de 12,60 \$. Si, por el contrario, se sumasen los valores positivos de aquellos bloques a extraer, se tendría un valor de 34 \$, que correspondería al valor del tajo si es pudiese explotar instantáneamente en un tiempo cero.

a. Block Number and Sequence

		3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,1		
		26	17	10	7	1	2	3	5	13	21		
			4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2			
			27	18	11	8	4	6	14	22			
				5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3				
				28	19	12	9	15	23				
					6,4	7,4	8,4	9,4					
					29	20	16	24					
						7,5	8,5						
						30	25						

Block Number → 7,1
 ↙ Sequence Number

b. Block Value and Sequence

		-1	-1	-1	-1	2	1	1	1	-1	-1		
		26	17	10	7	1	2	3	5	13	21		
			-2	-2	1	2	3	2	1	-2			
			27	18	11	8	4	6	14	22			
				2	4	5	3	2	1				
				28	19	12	9	15	23				
					1	3	4	2					
					29	20	16	24					
						2	3						
						30	25						

Block Value → 2
 ↙ Sequence Number

Figura 18: Diseño final del tajo y secuencia de extracción óptima

Fuente: Hustrulid W. & Kuchta M. (2006). "Open Pit Mine Planning & Design"

Este proceso se podría realizar, para un análisis más completo del problema, haciendo cambiar los valores de la tasa de interés (5%, 15%, 20%, y 25%), con lo que se obtendría diferentes secuencias de explotación en función de los diferentes valores. Como se puede observar, el método de trabajo es totalmente abierto (pudiendo eliminar o cambiar las restricciones impuestas), por lo que su utilización ofrece un notable interés en todos los estudios mineros que tiene como objetivo establecer la secuencia óptima de explotación.

2.9.8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los análisis de sensibilidad sirven para investigar la influencia de una variación en el valor de alguno o algunos parámetros o variables (inversión, costos de operación, ingreso, vida, etc.) sobre los diferentes índices que miden la rentabilidad del proyecto (VAN, TRI¹⁵, etc.).

Estos análisis permiten también identificar aquellas variables que tienen un mayor impacto en el resultado, frente a distintos grados de error en su estimación, ayudando a decidir acerca de la conveniencia de realizar estudios más profundos de esas variables críticas, con el objeto de mejorar las estimaciones. Reducir el grado de riesgo por error, o buscar otra estrategia de actuación.

Dependiendo del número de variables que se modifiquen simultáneamente, los análisis de sensibilidad se clasifican en unidimensionales o multidimensionales. En el análisis unidimensional, que es el que más se aplica, se modifica una sola variable, manteniendo las demás constantes: mientras que en el multidimensional se examinan los efectos que sobre un criterio económico tiene los cambios simultaneo de dos o más variables significativas.

La forma habitual de llevar a cabo los análisis de sensibilidad unidimensionales consiste en establecer unos cambios arbitrarios, por ejemplo del -20 %, -10 %, +10 % y +20 %, para cada una de las variables que se consideran importantes en el proyecto y evaluar, para cada hipótesis, la variación que sufre el criterio

¹⁵ Tasa de rentabilidad interna

económico empleado. Generalmente, la magnitud en que se altera cada variable se suele mantener constante a lo largo de la vida del proyecto, pero es posible ajustar los coeficientes de variación a los niveles de confianza de las estimaciones, ya que estos serán mayores en los primeros años de operación del proyecto y menores en los últimos periodos de explotación. La relación entre los porcentajes de cambio del criterio de evaluación y de las variables investigadas medirá la sensibilidad de cada una de ellas.

Es conveniente representar en un gráfico la colección completa de los resultados del análisis de sensibilidad. La figura 19 corresponde a un proyecto minero en el que las variables estudiadas son: los ingresos por ventas, los costos de capital y los costos de operación, suponiendo un ritmo de extracción fijado. El criterio económico empleado es el valor actual neto (VAN), con un valor de 26,5 M¹⁶ para el caso base. En el que la RMA¹⁷ es igual al 10%.

¹⁶ Millones

¹⁷ Tipo de interés (i).

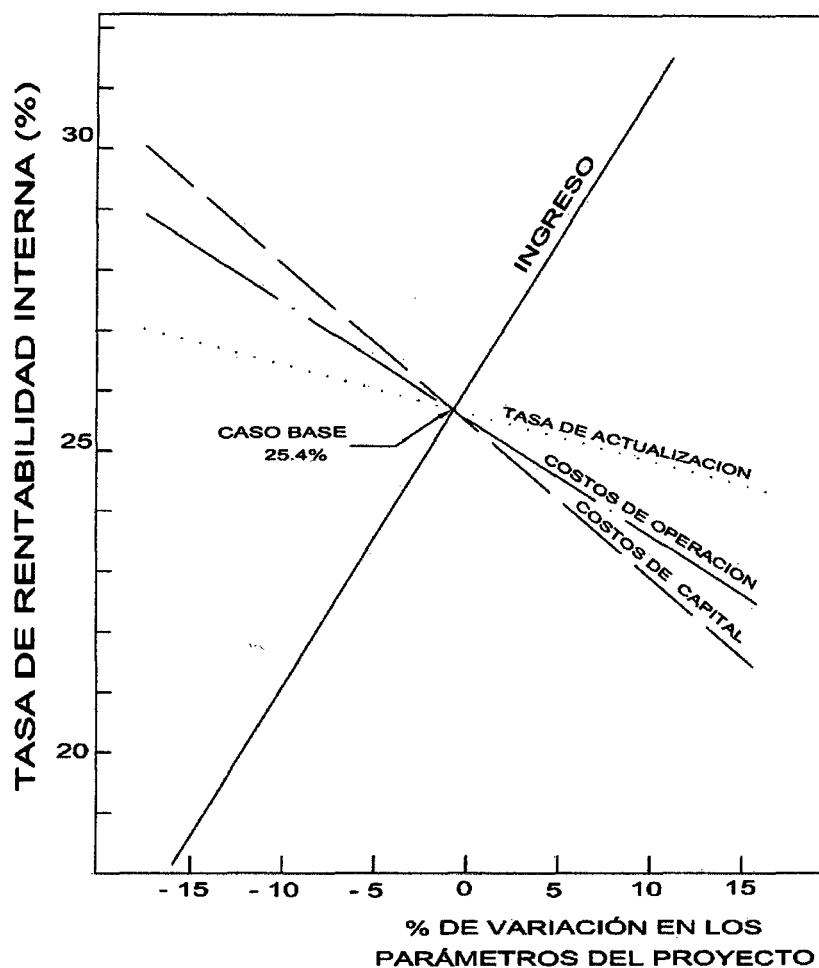


Figura 19: Gráfico de análisis de sensibilidad de un proyecto

2.9.9. ANÁLISIS DE RIESGO

Es práctica habitual realizar los análisis económicos suponiendo que los valores de todas las variables se conocen con certeza, y tomar en consideración el riesgo y la incertidumbre de una forma intuitiva, no cuantificada, confiando en la experiencia, la formación y el criterio del decidir. Sin embargo, en los proyectos mineros nunca existe la certeza total y son numerosos los factores que aportan una incertidumbre considerable.

La aplicación de modelos probabilísticos al análisis de proyectos de inversión proporciona una forma más rigurosa de proceder y, en consecuencia. Una base más segura para la toma de decisiones.

La disponibilidad de ordenadores ha permitido la utilización de métodos de simulación aleatoria, que requieren la repetición de un mismo proceso de cálculo cientos o miles de veces sobre un modelo matemático adecuado.

CAPITULO III: ANÁLISIS PARA LA DETERMINACION DEL PIT FINAL

3.1. DETERMINACIÓN DEL PIT FINAL ÓPTIMO

En términos simples, “Optimización del Tajo” es el proceso que consiste en determinar qué material vamos a extraer en la explotación de una mina a tajo abierto, y en qué secuencia. El resultado debe ser realista y factible para que el proyecto se pueda financiar y llevar a cabo.

La decisión estratégica de determinación del pit final óptimo ha sido eficientemente abordada utilizando el algoritmo de Lerchs-Grossman Este método está basado en un modelo de bloques que caracteriza a un cuerpo mineralizado, y son ampliamente utilizados en muchos paquetes de software comerciales disponible hoy en la industria minera.

El propósito del trabajo es la optimización del tajo Minaspampa y la determinación de una envolvente final basándose en un modelo económico con exigencias de viabilidad técnica, económica y geotécnico, para obtener el máximo posible de renta líquida, y que además sea capaz de ser sustentable en el tiempo ante cualquier evento futuro provocado por las variables que controlarán el sistema, dentro de un rango de variaciones racionalmente aceptables.

Para ello se realizarán diferentes análisis desde diversas perspectivas utilizando los parámetros de la línea base, a fin de efectuar recomendaciones con respecto a las selecciones del tajo final.

3.2. MODELO DE BLOQUES

En cualquier explotación minera, el primer paso es crear un modelo de bloque ajustado a un bloque tridimensional suficiente para cubrir el área de interés donde el bloque es discretizado en cientos de bloques tridimensionales menores (ver figura 20) que deben representar las características y propiedades del yacimiento que van de acuerdo al sistema de explotación a utilizar.

Las principales características del modelo de bloques de Minaspampa en cuanto en extensión, Coordenadas y dimensión de los bloques (Tabla 6):

Tamaño de unidades básicas (bloques): 6 m * 6 m * 6 m.

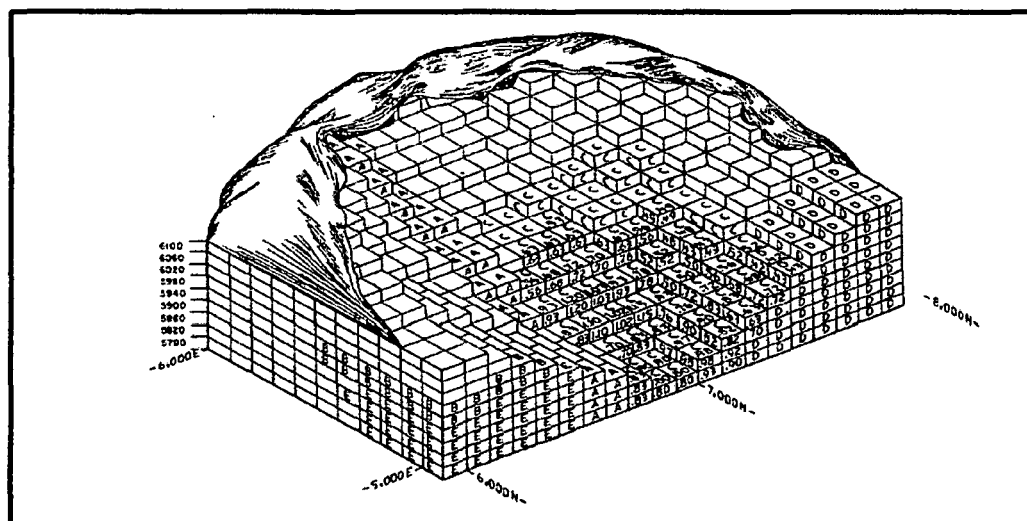


Figura 20: Posible representación para un modelo geológico.

Fuente: Hustrulid & Kucha (2006)

Elementos de interés: Au.

Orientación del modelo (Azimut): 35°

Coordenadas	Min(m)	Max(m)	Extent(m)	Bloque	Número de bloques por dirección:
ESTE	172 701	174 195	1 494		6 249 Columna
NORTE	9 117 652	9 119 428	1 776		6 296 Fila
ELEVACIÓN	3 500	4 100	600		6 100 Elevación

Tabla 6: Origen del modelo económico Minaspampa

3.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

Para la elaboración del presente trabajo se va a considerar solo el algoritmo de Lerchs Grossmann, por ser el más utilizado en la industria minera y en los diferentes programas informáticos que se llevan a cabo los procesos de optimización económica.

El programa informático utilizado para realizar el presente trabajo es el Whittle, el cual utiliza como algoritmo de optimización el método de Cono Flotante y Lerchs Grossmann.

3.4. MODELOS ECONÓMICOS

El propósito de un modelo económico en una operación es proveer un significado para calcular el efecto del cambio de ciertas variables. Para nuestros propósitos, es necesario poder calcular los efectos de leyes de corte cambiantes, ratios de producción, precios y costos en los flujos de caja. Los datos de precio, recuperación

y costo se usaron para determinar una ganancia por cada bloque estos valores fueron usados en el programa de optimización del tajo para encontrar el limite final del tajo económico.

Ley de corte fijada fueron usadas para definir bloques de mineral lixiviable y desmonte, si un bloque es un bloque de desmonte entonces un valor negativo de la ganancia igual al costo de minado del desmonte es asignado al bloque. Si el bloque es mineral entonces la ganancia del proceso de lixiviación/fundición/refinería es asignado al bloque figura 21.

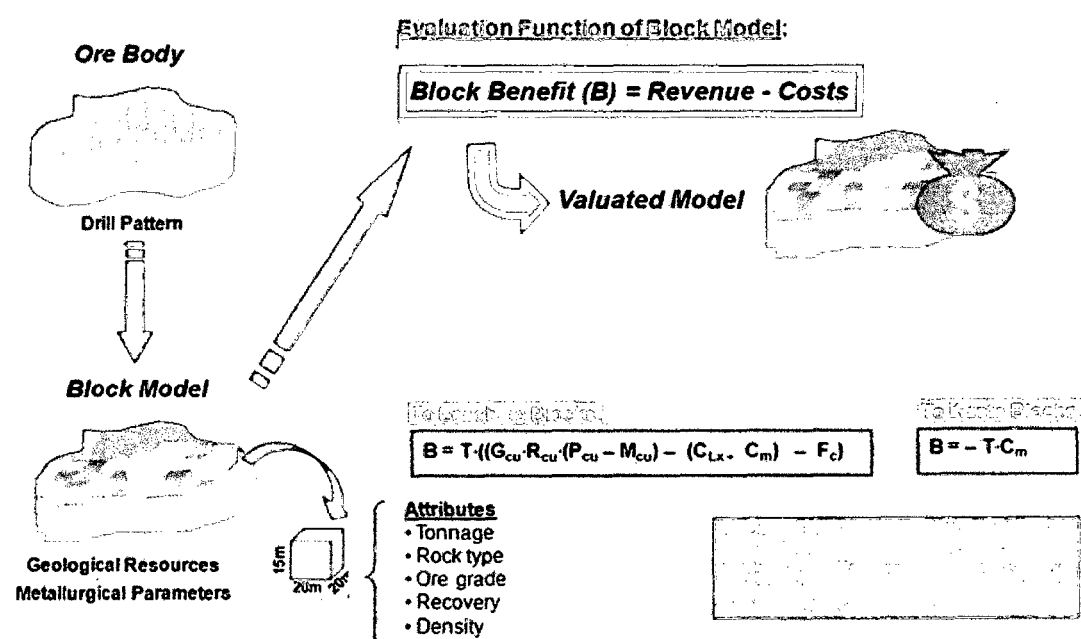


Figura 21: Evaluación económica de un modelo económico

Fuente: Curso básico 2009 Gemcom Whittle

3.5. DETERMINACIÓN DE LA LEY DE CORTE DEL ORO

La ley de corte económica de oro fue calculada para el tajo minaspampa. El límite de equilibrio de la ley de corte es definido como ley de oro donde el Ingreso = Costos o un beneficio nulo al extraer la última expansión marginal.

Parámetros generales utilizados para este caso de la optimización fueron:

- Precio del oro = 1 250 \$/oz
- Costo de minado = 1,2 \$/tn
- Recuperación = (66%)
- Costo de Procesos = 2,10 \$/tn
- Costo de ventas = 0,42 \$/gr.

El banco de acceso es el 3206 se aplicó el costo incremental de 0,013 \$/tn. La ley de corte de lixiviación de mineral fue determinado con la siguiente ecuación.

$$\text{Au Leach} = \frac{(\text{Costo de minado} + \text{Costo de Lixiviación} + \text{Costo Incremental de acarreo})}{\left(\frac{\text{Precio} - \text{Costo de venta}}{31,1035}\right) * \text{Recuperación Lixiviación}}$$

$$\text{Au Leach} = \frac{(1,2 + 2,1 + 0,013)}{\left(\frac{1250 - 13,0635}{31,1035}\right) * 0,66} = 0,126\text{gr/tn}$$

Cada bloque cuenta con valores asociados a las distintas variables que caracterizan al yacimiento, y que son de interés en este estudio como.

- Tipo de roca
- Densidad
- Ley de oro

3.6. METODOLOGÍAS UTILIZADAS

Metodologías y técnicas de optimización han sido utilizadas para los estudios de optimización del tajo Minas pampa. En todos los casos, estos se han aplicado en whittle esquema general para el análisis se muestra en la figura 22.

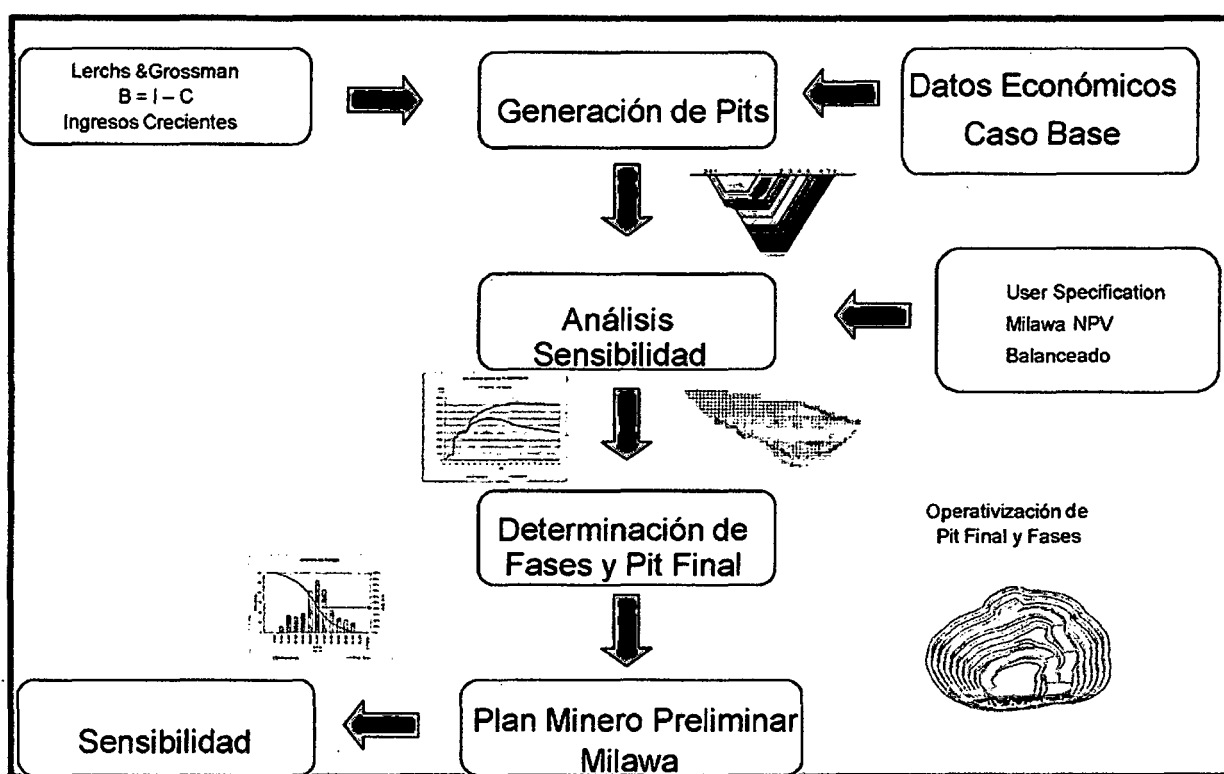


Figura 22: Metodología de trabajo

Fuente: Curso básico 2009 Gemcom Whittle

El estudio de optimización del tajo Minas pampa comienza con la optimización de dicho tajo, utilizando el algoritmo de Lerchs Grossman para delimitar el pit final. Jeff Whittle ha enfocado la atención en expandir los linderos íntegros de optimización para la industria del recurso, aplicada al negocio minero y al modelo operacional con técnicas de construir en forma integrada mina, geología, tratamiento, transporte y los modelos de mercado, que son optimizadas por algoritmos poderosos permitiendo la optimización, con el propósito de controlar los valores de esas variables que son consideradas negociables, debido al número de variables económico-técnico que se controlan simultáneamente (ver anexo figura 23), con este método es posible desarrollar los planes a largo plazo que maximice el valor más alto.

En la actualidad, no hay ninguna herramienta o técnica para proporcionar un plan de mina totalmente óptimo para cualquier depósito

La Información nunca es perfecta, por lo que se trata de hacer es el mejor uso de la información que está disponible y entender sus riesgos y debilidades.

Optimización del Pit final es una pieza estática de análisis que no intenta determinar cuándo un bloque de material será minado, por lo que no es posible considerar el hecho de que los precios, costos, capacidades y recuperaciones pueden cambiar con el tiempo. Estos factores sólo pueden ser considerados durante la optimización del plan de producción.

Las técnicas de optimización se pueden utilizar para aumentar significativamente el valor de las empresas mineras, permitiendo mejores decisiones a largo plazo de planificación. El pit final no es un procedimiento perfecto en el contexto de la optimización del tajo Minaspampa, pero tenemos que empezar utilizando los parámetros de la línea base.

En la tabla 7 ver anexo, se ha considerado un precio base del oro constante de 1 250 U\$\$/oz, realizando la corrida de los pit anidados en un intervalo de 0,5 a 1,36 con pasos de 0,01 determinando así 86 pit anidados y una para cada valor del revenue factor, los resultados obtenidos se representan en la siguiente figura 24.

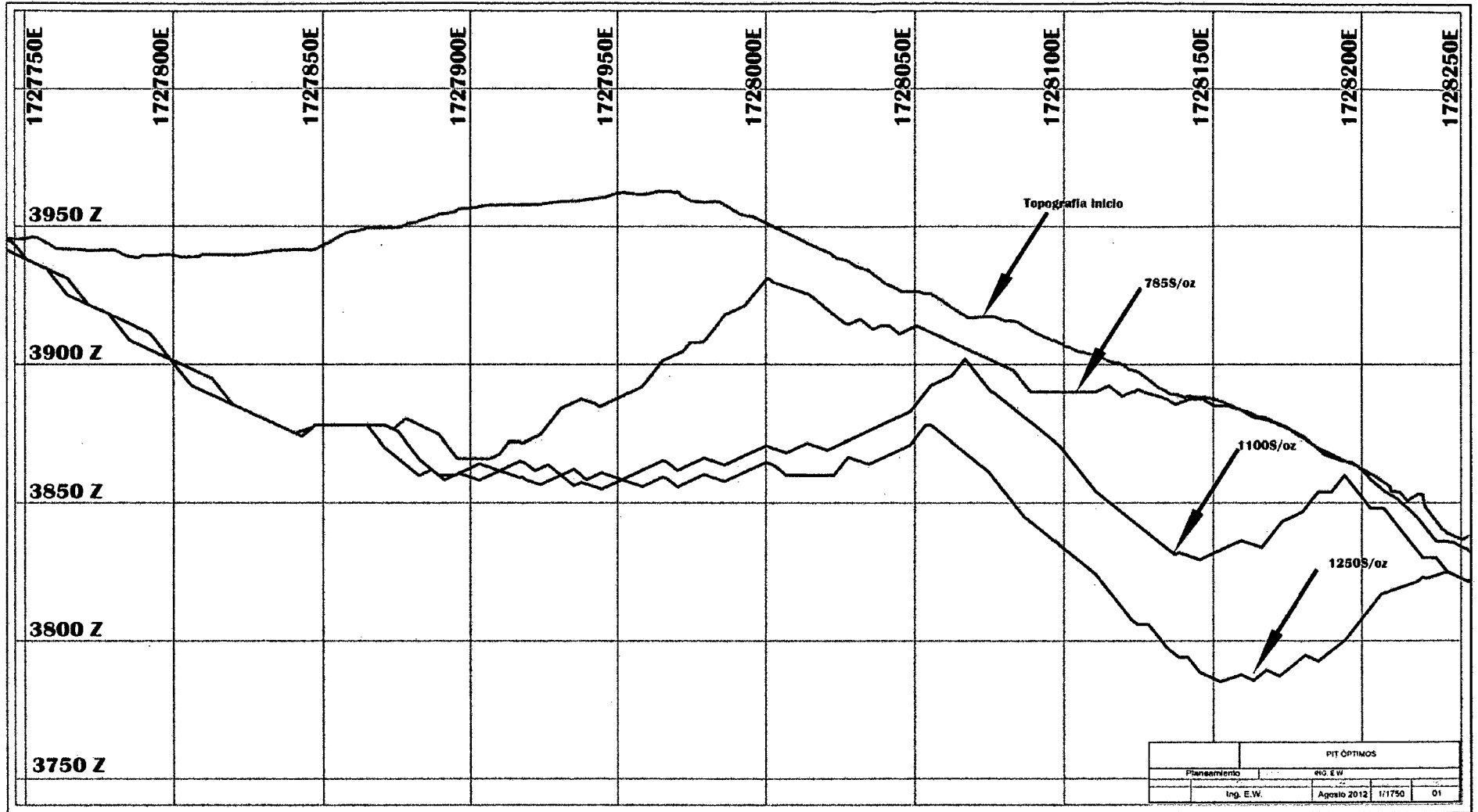


Figura 24: Esquema de pits óptimos generados por una secuencia de precios oro

3.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SELECCIÓN DEL PIT FINAL

Luego de la generación de los pits anidados se efectúa una evaluación económica preliminar para seleccionar el pit final optimizado, para ello se genera un escenario económico donde se fija un precio, ritmo de producción mina y planta, tasa de descuento, gastos de administración y ventas, etc. En esta evaluación se calcula para cada pit anidado el valor presente neto asociado a dos secuencias de extracción, denominadas "Worst Case" y "Best Case".

El primero corresponde a la concreción del plan minero mediante la extracción banco a banco del material que está dentro de cada envolvente económica, mientras que el segundo corresponde al plan resultante de la extracción pit a pit del material contenido en la envolvente económica (ver figura 25). Es decir, no se puede acceder al tajo siguiente sin haber terminado el tajo anterior.

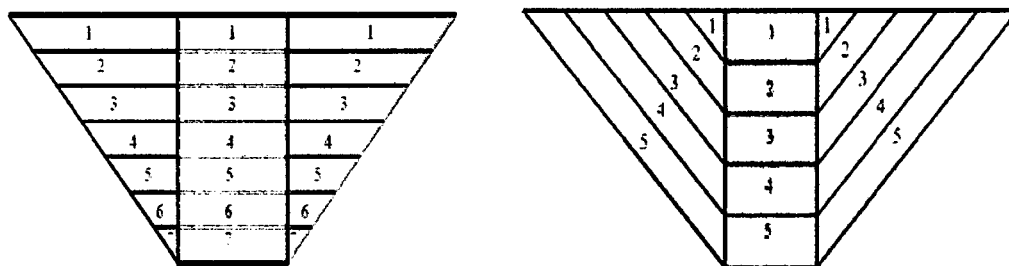


Figura 25: Secuencias de extracción Worst Case (izquierda) y Best Case (derecha)

Fuente: (Galo Muños, 2012) Modelo de costos para la valorización de planes mineros

En consecuencia el límite final de un tajo define el tamaño, forma y el final de su vida útil, generalmente busca maximizar el recurso.

3.7.1. ANÁLISIS DE LA LÍNEA BASE

En esta etapa se realiza un análisis de la zona de interés, con la información base se procede al análisis del pit final, este análisis se realiza con la finalidad de poder definir los posibles pit de interés dentro de un rango de factores del precio del oro revenue factor, en la (tabla 8 ver anexo) se muestran 86 pit anidados desplegando por cada uno de los pits anidados la cantidad de estéril, mineral, ley media, la relación desmonte mineral, el tonelaje total de material contenido, la vida del pit en años y el VPN para la peor y mejor caso de explotación.

De acuerdo a las estrategias básicas de consumo de reservas que nos entrega Whittle, podemos ir desde el peor caso (WORST) hasta la mejor caso (BEST), que será siguiendo la secuencia de pits anidados.

Considerando estos criterios extremos, de la tabla 8 podemos definir el intervalo comprendido entre el pit N° 27 y el 42 que representan los mayores valores del VPN para cada estrategia, nuestro pit final seleccionado deberá estar definido al interior de este intervalo al no conocer realmente que estrategia de consumo utilizaremos.

La razón de elegir este intervalo se ve más clara en la figura 26 que para la situación más favorable, la zona encerrada en la elipse muestra los mayores valores del VPN, por lo que parecería lógico seleccionar el pit que muestre el máximo valor de VPN, pero este sector muestra un comportamiento aproximadamente constante o cercano a la horizontal que nos hace pensar ¿Convendrá

seleccionar el mejor VPN, sin considerar los tonelajes a mover y/o tratar con respecto a las variaciones de VPN en esa zona? .

Además al observar la tabla 8 se podría pensar para estos pits anidados que el más pequeño tendría mayor ganancia por tonelada ya que tiene mejor ley media y menos cantidad de estéril, pero tiene una vida más corta y consecuentemente un menor valor neto frente a los pits posteriores. A medida que se aumenta el tamaño y la profundidad de los pits, los valores del VPN (Valor Presente Neto) se incrementan hasta un punto donde las reservas crecientes de mineral son contrarrestadas por la razón estéril mineral, que también se incrementa lo que hace que los valores VPN de los grandes pits comienzan a decrecer.

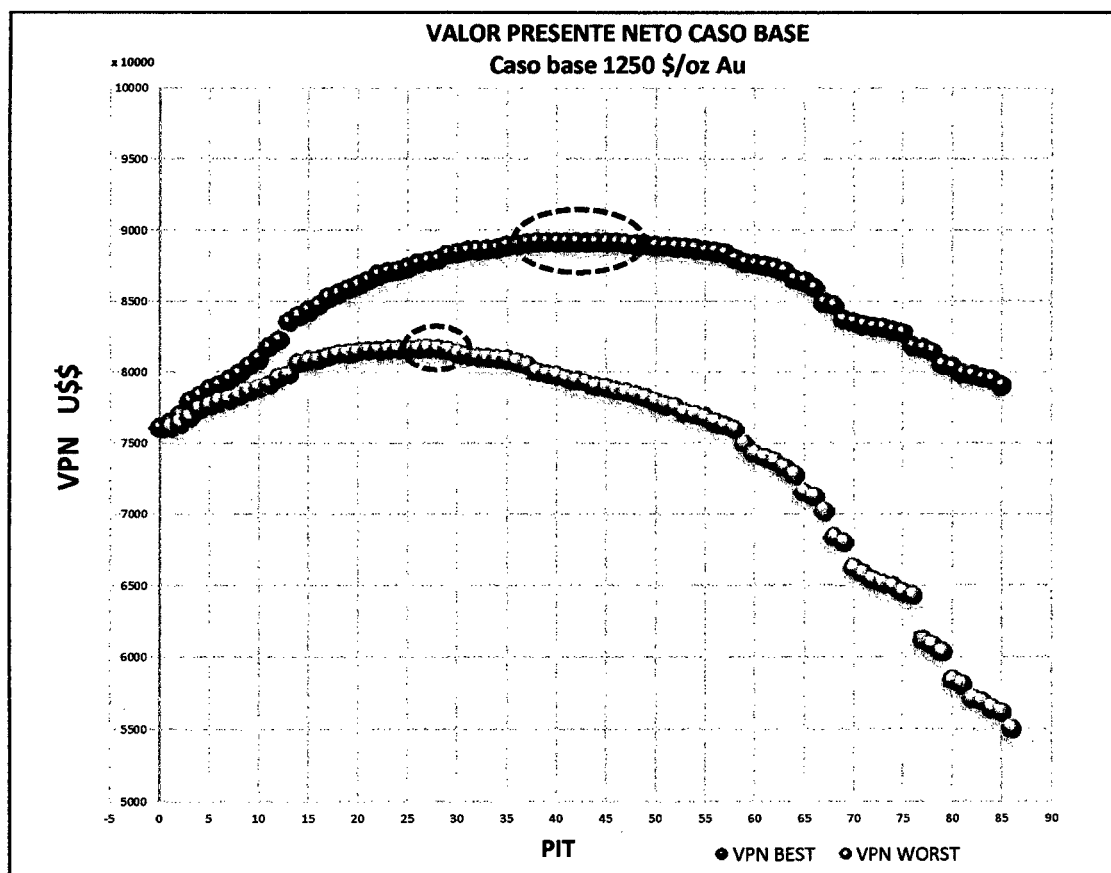


Figura 26: Gráfico VPN v/s pit Caso base

En la figura 26 podemos ver que la zona con mayor pendiente de las curvas se traduce en mayor incertidumbre porque cualquier cambio en el tamaño del pit presentará una gran variación con respecto a su VPN dejándonos sin ninguna flexibilidad u holgura para el posterior diseño y operativización, con todas las consecuencias que ello significa, ya que como es lógico, el pit optimizado encontrado por Whittle variará en cierto porcentaje con respecto al pit operativizado.

3.7.2. ANÁLISIS EN VARIACIÓN DE TONELAJES A MOVER

En la figura 27 podemos apreciar la diferencia de tonelaje que representan los pits 27 y 42, lo que hace merecer mayor grado de análisis en la selección del pit final.

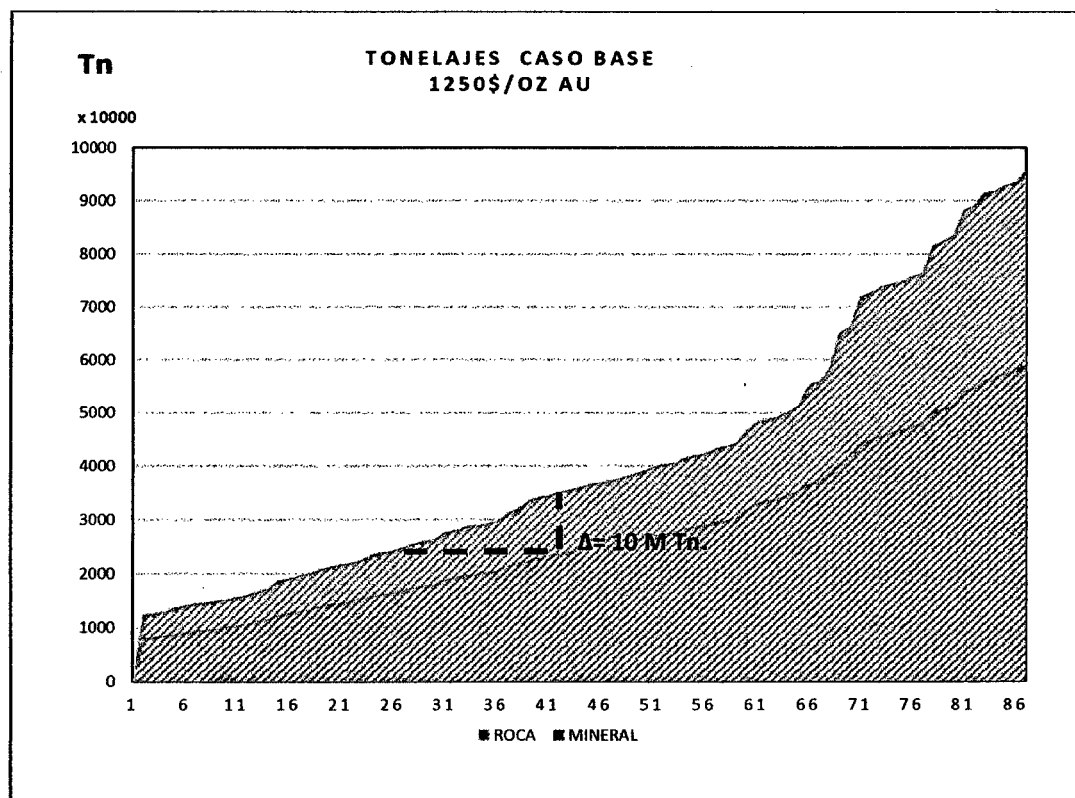


Figura 27: Tonelajes de los distintos pits

Podemos ver claramente que la diferencia en el tonelaje a mover es cercana a las 10 079 567 toneladas de material, que traducido en infraestructura, preparación y costos en general, representará diferencias en millones de dólares que sumado al riesgo que intrínsecamente acompaña a la minería transformará esta decisión en una de las más importantes a la hora de seleccionar el pit final.

La tabla 9 muestra cómo se comporta cada pit comparado con el máximo valor a obtener en cada una de las estrategias, además de la variación de tonelajes a mover y tratar. Sin duda el análisis de variación de tonelajes se verá reflejado en el monto de la inversión, como ya se ha mencionado anteriormente.

Como la situación de explotación del pit puede estar en cualquier posición del rango seleccionado, debemos seleccionar aquellos tajos cuyos tonelajes manifiesten la menor variación de VPN con respecto a los pits extremos pues así tenemos un mayor grado de confianza en la selección del pit final.

Los pits destacados en amarillo (tabla 9) representan las menores variaciones de VPN en conjunto Worst y Best, en especial los pits 32 y 33. Ahora, si eligiéramos el pit 42 y nuestra estrategia de consumo coincidiera con la mejor (BEST), entonces el VPN sería el óptimo, pero, si nuestra estrategia de consumo coincide con la peor, en ese caso vemos que nuestro VPN es casi un 2,91 % menor que si con la misma estrategia hubiésemos seleccionado el pit 27.

Esto muestra que la elección nos da mayor confianza donde exista menor variación de VPN (figura 28).

PIT	ROCA	MINERAL	VPN WORST	VPN BEST	Variacion de cada pit en comparacion al mayor VPN en cada caso			
	TON	TON	US\$	US\$	WORST	BEST	Tn-Roca	Tn-Mineral
12	16 703 718	11 336 198	79 579 188	81 747 030	-2,53 %	-8,31 %	-34,60%	-34,91 %
13	17 141 157	11 674 774	79 832 508	82 223 967	-2,22 %	-7,77 %	-32,89%	-32,96 %
14	18 705 569	12 488 114	80 624 662	83 544 916	-1,25 %	-6,29 %	-26,76%	-28,29 %
15	19 142 482	12 830 139	80 765 985	83 934 384	-1,07 %	-5,86 %	-25,05%	-26,33 %
16	19 639 548	13 184 745	80 807 817	84 328 405	-1,02 %	-5,41 %	-23,10%	-24,29 %
17	20 085 913	13 532 666	81 016 835	84 697 349	-0,77 %	-5,00 %	-21,36%	-22,29 %
18	20 798 057	14 046 260	81 245 297	85 255 678	-0,49 %	-4,37 %	-18,57%	-19,35 %
19	21 184 327	14 331 470	81 299 965	85 516 585	-0,42 %	-4,08 %	-17,06%	-17,71 %
20	21 682 180	14 694 146	81 388 935	85 850 259	-0,31 %	-3,71 %	-15,11%	-15,63 %
21	22 008 676	14 984 225	81 466 361	86 063 065	-0,22 %	-3,47 %	-13,83%	-13,96 %
22	22 608 382	15 395 562	81 517 219	86 395 666	-0,15 %	-3,09 %	-11,48%	-11,60 %
23	23 528 150	15 902 931	81 557 994	86 806 967	-0,10 %	-2,63 %	-7,88%	-8,68 %
24	23 918 901	16 241 676	81 566 456	87 001 634	-0,09 %	-2,42 %	-6,35%	-6,74 %
25	24 239 277	16 504 685	81 564 220	87 138 011	-0,10 %	-2,26 %	-5,10%	-5,23 %
26	24 792 408	16 932 761	81 582 806	87 357 677	-0,07 %	-2,02 %	-2,93%	-2,77 %
27	25 540 672	17 415 347	81 641 996	87.621.663	0,00 %	-1,72 %	0,00%	0,00 %
28	26 005 159	17 711 045	81 623 064	87 771 759	-0,02 %	-1,55 %	1,82%	1,70 %
29	26 300 679	17 982 188	81 493 942	87 871 875	-0,18 %	-1,44 %	2,98%	3,25 %
30	27 644 284	18 932 026	81 248 402	88 277 962	-0,48 %	-0,98 %	8,24%	8,71 %
31	27 995 417	19 247 114	81 122 106	88 371 289	-0,64 %	-0,88 %	9,61%	10,52 %
32	28 713 466	19 671 978	81 030 252	88 518 091	-0,75 %	-0,71 %	12,42%	12,96 %
33	29 021 740	19 961 870	80 965 357	88 580 669	-0,83 %	-0,64 %	13,63%	14,62 %
34	29 274 610	20 221 497	80 897 761	88 627 177	-0,91 %	-0,59 %	14,62%	16,11 %
35	29 703 471	20 530 331	80 840 871	88 685 923	-0,98 %	-0,53 %	16,30%	17,89 %
36	31 309 877	21 547 619	80 655 929	88 893 479	-1,21 %	-0,29 %	22,59%	23,73 %
37	31 994 047	21 974 543	80 424 747	88 964 686	-1,49 %	-0,21 %	25,27%	26,18 %
38	33 523 849	22 623 580	79 949 451	89 075 431	-2,07 %	-0,09 %	31,26%	29,91 %
39	34 275 661	23 064 597	79 797 659	89 119 927	-2,26 %	-0,04 %	34,20%	32,44 %
40	34 538 906	23 303 644	79 707 427	89 132 341	-2,37 %	-0,03 %	35,23%	33,81 %
41	35 240 893	23 710 219	79 481 025	89 149 767	-2,65 %	-0,01 %	37,98%	36,15 %
42	35 620 239	24 019 015	79 333 601	89.154.864	-2,83 %	0,00 %	39,46%	37,92 %
43	36 121 350	24 373 929	79 166 510	89 153 739	-3,03 %	0,00 %	41,43%	39,96 %
44	36 658 673	24 734 827	78 970 473	89 144 894	-3,27 %	-0,01 %	43,53%	42,03 %
45	36 956 577	24 984 684	78 857 740	89 135 437	-3,41 %	-0,02 %	44,70%	43,46 %
46	37 476 576	25 360 668	78 637 086	89 111 847	-3,68 %	-0,05 %	46,73%	45,62 %
47	37 810 093	25 644 453	78 531 934	89 093 912	-3,81 %	-0,07 %	48,04%	47,25 %
48	38 452 909	26 130 103	78 346 274	89 050 875	-4,04 %	-0,12 %	50,56%	50,04 %
49	39 044 692	26 510 512	78 147 436	89 010 289	-4,28 %	-0,16 %	52,87%	52,23 %
50	39 835 636	27 011 730	77 857 462	88 948 159	-4,64 %	-0,23 %	55,97%	55,10 %
51	40 350 575	27 411 761	77 653 446	88 897 404	-4,89 %	-0,29 %	57,99%	57,40 %
52	40 546 778	27 677 221	77 521 528	88 870 558	-5,05 %	-0,32 %	58,75%	58,92 %
53	41 539 250	28 351 803	77 135 356	88 754 429	-5,52 %	-0,45 %	62,64%	62,80 %
54	41 950 691	28 681 689	76 952 576	88 703 006	-5,74 %	-0,51 %	64,25%	64,69 %
55	42 363 386	29 027 271	76 761 065	88 645 892	-5,98 %	-0,57 %	65,87%	66,68 %
56	43 294 451	29 599 790	76 394 388	88 521 462	-6,43 %	-0,71 %	69,51%	69,96 %

Tabla 9: Comparación de cada pit frente al máximo VPN en cada caso

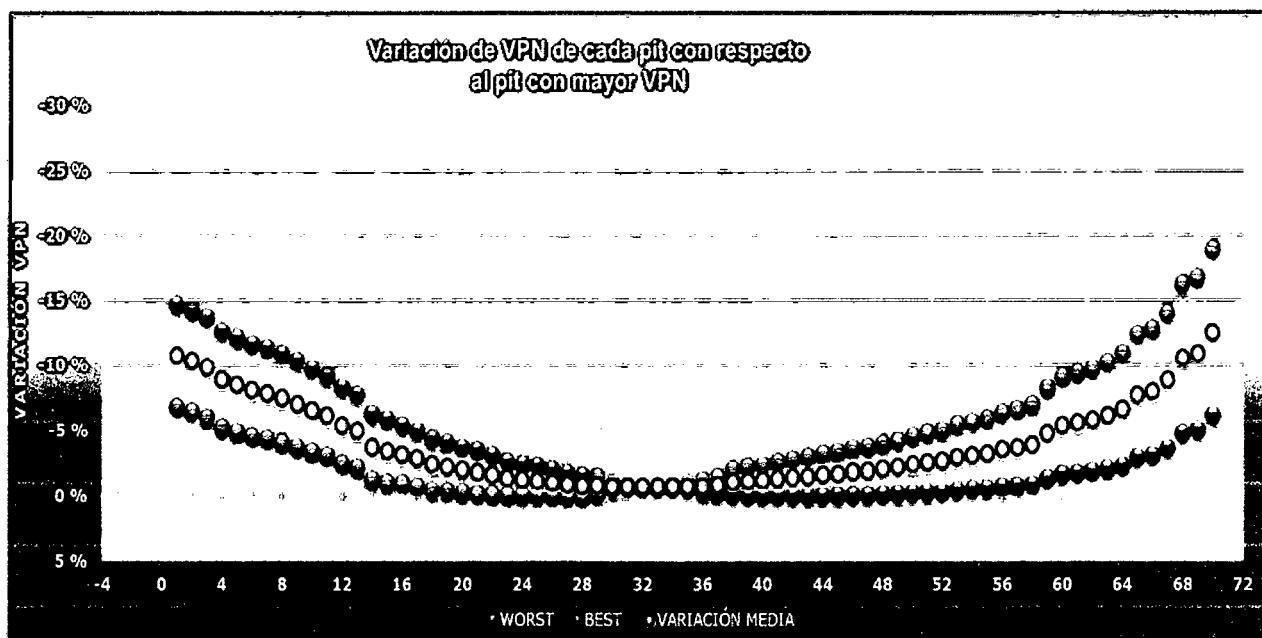


Figura 28: Variación VPN

Por lo tanto el intervalo seleccionado mediante el análisis realizado al variable tonelaje es desde el pit 29 al pit 40.

3.7.3. RAZÓN ESTÉRIL/MINERAL

Otro factor importante a la hora de seleccionar nuestro pit final es la razón estéril/mineral mostrada por cada pit, aunque para este caso en estudio, las razones se encuentran en valores bajos a medio.

Podemos ver claramente en la figura 29 que los primeros pits poseen valores ligeramente altos, pero es característico que suceda aquello debido a que generalmente estos pit (1-6) no pueden constituir pit final por sus dimensiones.

Desde el pit 6 al 11 encontramos un decrecimiento, pero a partir del pit 16 la razón estéril/mineral tiende a un comportamiento ligeramente variable fluctuando entre

valores comprendidos desde 0.45 al 0.49. La relación es encontrada en los pits 30 y 38 ver tabla 8. Mostrando el pit 35 el valor más bajo entre este intervalo seleccionado.

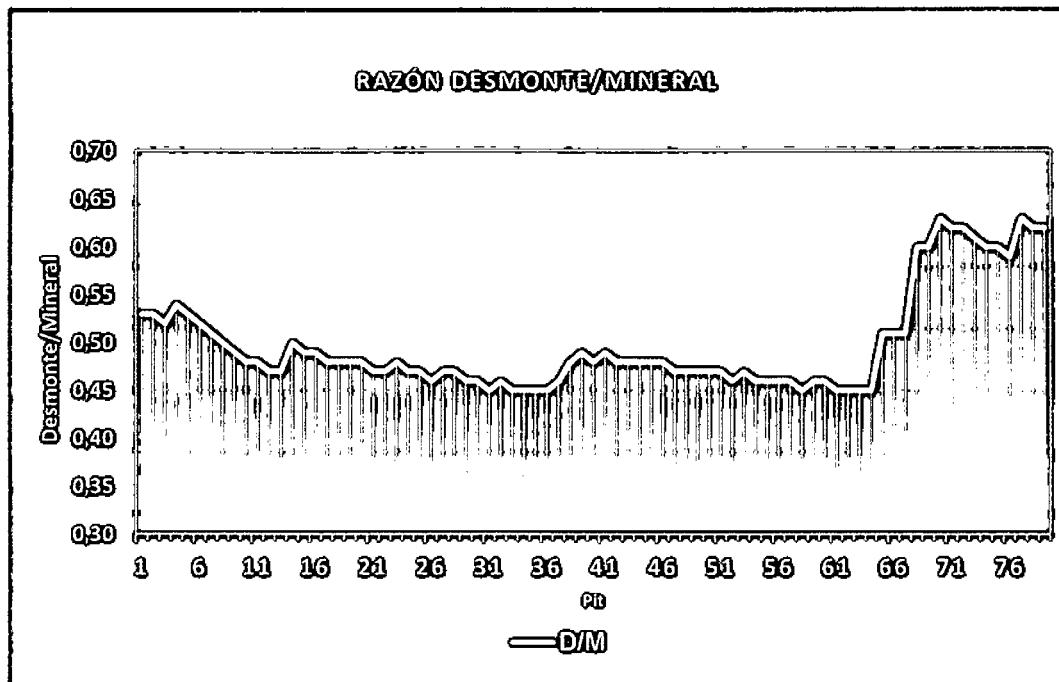


Figura 29: Razón estéril-mineral v/s Pit

3.7.4. VIDA DE LA MINA

También se debe agregar el factor tiempo, por ejemplo una operación de alto riesgo podría favorecer la selección de un pit final pequeño, que contendrá las mejores leyes a menor costo, con un período de explotación también menor, el pit 22 por ejemplo. Pero otra política corporativa de una empresa puede ser que debido a argumentos estratégicos se seleccione un gran pit ya que existen bastantes probabilidades que las reservas mejorarán con la profundidad o porque esto

generará más tiempo para desarrollar otras metas. Sin embargo, siempre se debe tener presente que la vida del proyecto o de la mina pueden ser afectados drásticamente cuando los valores que fueron considerados como parámetros para la definición de la envolvente, cambian a tal punto de escapar de control. En todo caso todo proyecto medianamente bien evaluado debe asegurar el 100% de viabilidad para el periodo de amortización.

Para este caso en estudio, asumiremos que por política de la empresa la vida de la mina debe ser superior a 5 años (para evaluación). Según lo anterior la selección debería estar a partir del pit 27 (figura 30).

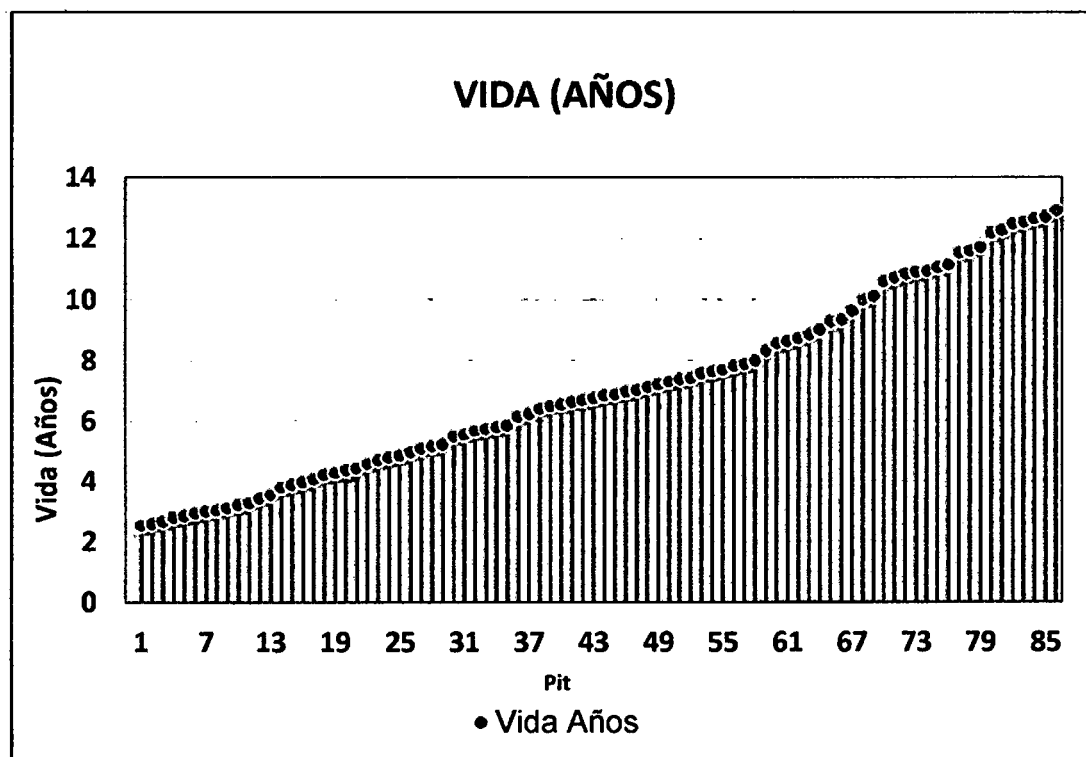


Figura 30: Vida vs pit

3.7.5. VARIACIÓN DE PRECIOS

Sin duda en la mayoría de los yacimientos de oro, el grueso de los ingresos producidos por la explotación viene del elemento oro, siendo este análisis el de mayor importancia ya que cualquier variación en el precio, leyes o recuperaciones no solo afectará el flujo de caja de nuestra operación, si no que producirá probablemente un traslado y/o cambio de forma en nuestra curva VPN v/s Pits, encontrando el óptimo en otra ubicación.

3.7.5.1. PRECIO DEL ORO

Ahora mantendremos los mismos parámetros de los casos anteriores pero pediremos que la evaluación sea hecha con variaciones de precios del elemento principal, oro, con valores que fluctuarán desde 620\$/ozt hasta 1700\$/ozt, con incrementos de 5\$/ozt. Esto es hecho con el fin de poder observar el comportamiento de cada pit en relación al VPN con respecto al precio del elemento. La tabla 8 contiene los resultados, identificando para cada precio las siguientes columnas:

- PIT
 - ROCA: Cantidad de material a extraer en miles de toneladas
 - MINERAL: Cantidad de material a lixiviar de toneladas
 - NPV: Valor Presente Neto de cada pit en cada estrategia.
 - VIDA: Años
-

Si se asume que el precio se encontrará desde 1010 a 1250\$/oz y sin ningún previo análisis el intervalo de interés debería estar entre el pit 27 y el 42 que representan los máximos valores de VPN para ambas estrategias y considerando las variaciones de precio (ver anexo tabla 8)

Pero trabajar con ambas estrategias y con un intervalo poco preciso no ayudará en la selección del pit final, es por ello que para reducir el rango de pits se deberá optar por una de las dos estrategias en este análisis. Tomemos como referencia el precio del caso base (1250\$/oz) y comparemos los pit que representan los mayores VPN por cada estrategia tabla 10.

Tabla 10: Comparación entre mayores VPN para cada estrategia

ESTRATEGIA	1000,0\$\$/oz		1250,0\$\$/oz		1600,0\$\$/oz	
	WORST	BEST	WORST	BEST	WORST	BEST
Max. VPN (M U\$\$)	49,82	55,21	81,64	89,15	121,12	138,57
Variación pit 27 c/r al máximo VPN	0%	-3,7%	0%	-1,7%	0%	-8%
Variación del pit 42 c/r al máximo VPN	-30%	-1,4%	-2,9%	0%	-15%	-0,3%

Si eligiera el pit 42 como pit final y lo evaluamos al precio base de 1250\$, en el mejor de los casos el VPN será de 89,15 M \$ pero esta estrategia nunca se logrará e incluso es posible que esta se acerque a la peor, pudiendo llegar hasta 79,33 M \$ que es menor en un 2,9 % a los 81,64 M \$ que representa el pit 27 en el peor de los casos y al mismo precio.

Siempre que elijamos con el peor de los casos (Worst) y nuestra estrategia de consumo real se acerque a la mejor (Best), la variación con respecto al mayor

VPN será considerablemente menor que si eligiéramos por el mejor caso y que la estrategia real se acercase a la peor. Esto además será avalado por qué siempre el óptimo en el peor de los casos es de menor tamaño que el óptimo en el mejor.

Por lo anterior es que nuestro interés debería centrarse desde el pit 27 al 40 y considerar de ahora en adelante solo el peor de los casos.

Ahora que ya hemos acotado el intervalo de selección de los pits y decidido trabajar con la peor estrategia, estamos en condiciones de analizar el comportamiento de los pits frente a las variaciones de precio de los elementos de interés.

Las figuras 31 y 32 muestran las variaciones y comportamientos del VPN de los diferentes pits para distintos precios:

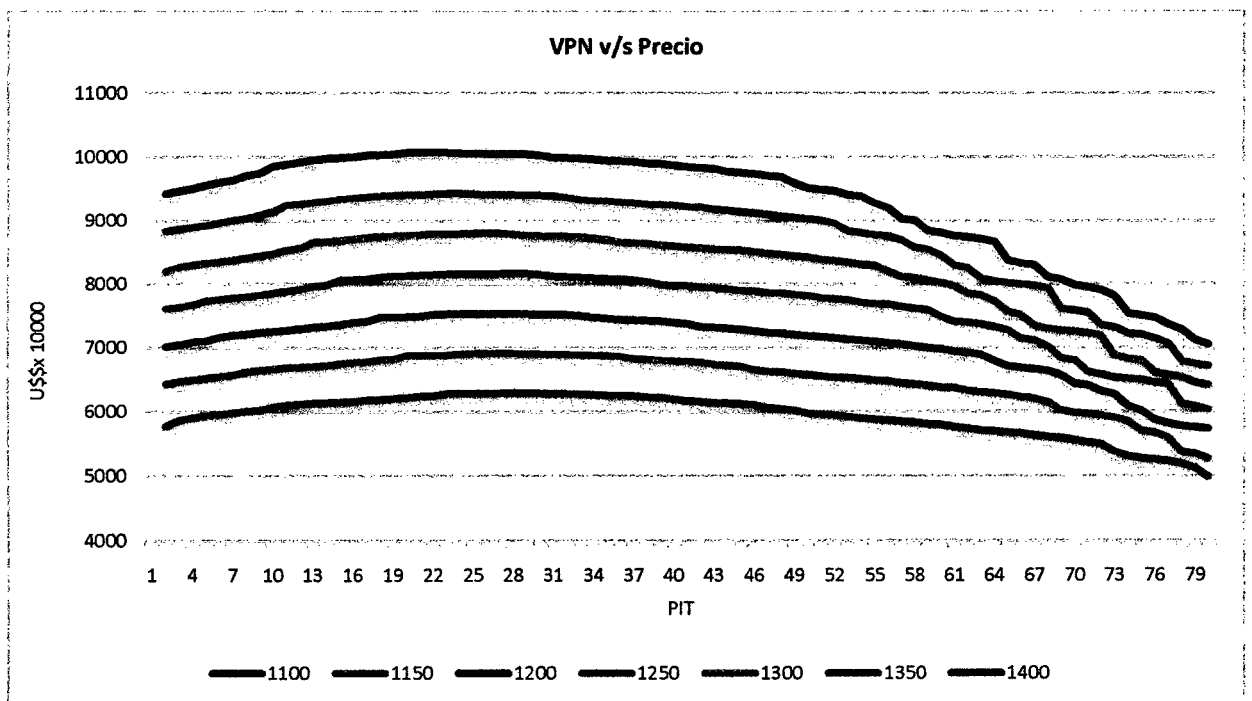


Figura 31: VPN (diferentes precios) v/s pit

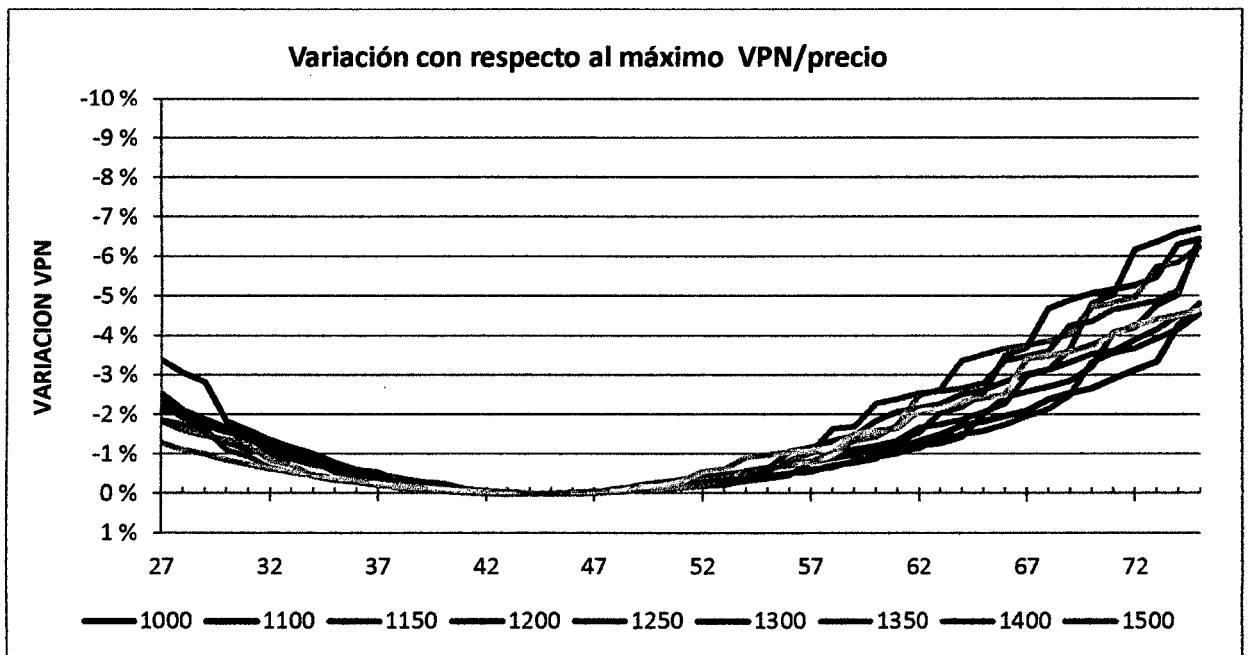


Figura 32: Variación VPN con respecto al pit 42 v/s precios

En el gráfico de la figura 32 podemos ver como son trasladados los máximos VPN para cada precio y que para los pits menores al 67 encontramos variaciones inferiores al 5% con respecto al mejor VPN. De esta manera podemos dar un mayor grado de seguridad al inversionista ya que frente a cualquier cambio que sufra el precio del metal, nuestro pit óptimo no afectará de gran manera su VPN.

3.7.5.2. VARIACIÓN DE COSTOS

Dentro de las principales variables que definirán nuestro pit final, la variable costos es una de las más influyentes, esto en concordancia con lo expresado anteriormente servirá para poder evaluar, además del comportamiento de los pits, cuanto se puede invertir en el estudio de nuevas técnicas que mejoren y abaraten los procesos.

En este análisis veremos cómo se comporta la curva de VPN para los pits comprendidos entre el 27 y el 42 frente a variaciones de costos de planta y mina, un análisis más allá del pit 42 no ayudará por que las variaciones serán crecientes.

Para el primer análisis se asumirá una variación del costo mina base (1,20 \$/t) desde un -5% (1,14 \$/t) hasta un aumento de 10% (1,32\$/t). Los valores mostrados en la tabla 11 nos permiten observar un comportamiento prácticamente lineal en la relación variación costo mina v/s VPN. En general, el VPN varía en un promedio entre el 1% y el 1.5% por cada 5% que cambie el costo mina. Lo importante es manifestar que para estas variaciones, el diseño del pit final nuevamente no se verá afectado, ya que no hay alteración en la forma de la curva, sino un traslado de ella (ver figura 33).

Tabla 11: Variación de costos vs pit

PIT	Base 1,20	Baja en 5% 1,14	Aumento en 5% 1,26		Aumento en 10% 1,40		
	VPN	VPN	$\Delta\%$	VPN	$\Delta\%$	VPN	$\Delta\%$
27	81 641 996	82 742 169	1,33 %	80 457 071	-1,47 %	79 360 007	-1,38 %
28	81 623 064	82 593 263	1,17 %	80 430 856	-1,48 %	79 325 152	-1,39 %
29	81 493 942	82 410 783	1,11 %	80 474 891	-1,27 %	79 305 897	-1,47 %
30	81 248 402	82 325 138	1,31 %	80 405 063	-1,05 %	79 290 168	-1,41 %
31	81 122 106	82 274 387	1,40 %	80 184 522	-1,17 %	79 290 045	-1,13 %
32	81 030 252	82 222 218	1,45 %	79 950 459	-1,35 %	79 098 876	-1,08 %
33	80 965 357	82 160 850	1,46 %	79 840 180	-1,41 %	78 937 478	-1,14 %
34	80 897 761	82 044 307	1,40 %	79 728 318	-1,47 %	78 648 313	-1,37 %
35	80 840 871	81 522 085	0,84 %	79 661 207	-1,48 %	78 541 784	-1,43 %
36	80 655 929	81 405 584	0,92 %	79 600 620	-1,33 %	78 425 247	-1,50 %
37	80 424 747	81 281 324	1,05 %	79 372 710	-1,33 %	78 342 447	-1,32 %
38	79 949 451	81 165 423	1,50 %	79 283 736	-0,84 %	78 274 822	-1,29 %
39	79 797 659	80 978 192	1,46 %	79 001 503	-1,01 %	77 984 369	-1,30 %
40	79 707 427	80 852 988	1,42 %	78 873 209	-1,06 %	77 885 241	-1,27 %
41	79 481 025	80 644 177	1,44 %	78 385 905	-1,40 %	77 550 431	-1,08 %
42	79 333 601	80 525 689	1,48 %	78 211 402	-1,43 %	77 450 628	-0,98 %

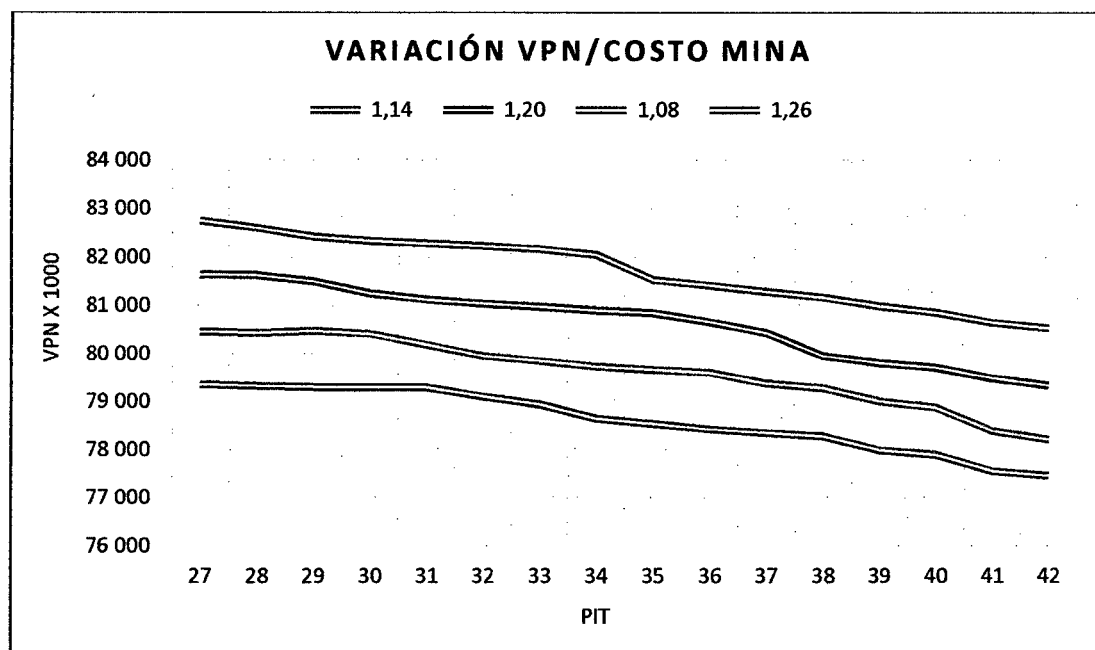


Figura 33: VPN vs Costos mina

Los costos de procesamiento cubren todos los gastos relacionado al procesamiento del mineral donde está determinado por la cantidad de toneladas a

ser tratada (lixiviada). El análisis para la variación del costo de procesamiento arroja un comportamiento casi lineal, donde también se puede ver en la figura 34 que la elección de un pit óptimo no se ve alterada ante tales cambios, pero si provoca cambios a nivel de VPN. Las variaciones para este caso están en el rango de 0,5% a un 1,5% (ver anexo tabla 12) ante un aumento en un 5% en el costo de procesamiento y un aumento promedio del 1,17% del VPN (0,96M \$) frente a una disminución del 5% en los costos, que representaría un cambio drástico en las técnicas de procesamiento a emplear.

No alterará la elección del pit final en gran medida pero si producirá cambios a nivel de flujo de caja además de agregar o disminuir la cantidad de mineral con destino a planta. Por lo tanto el intervalo seleccionado será desde el 35 al 40.

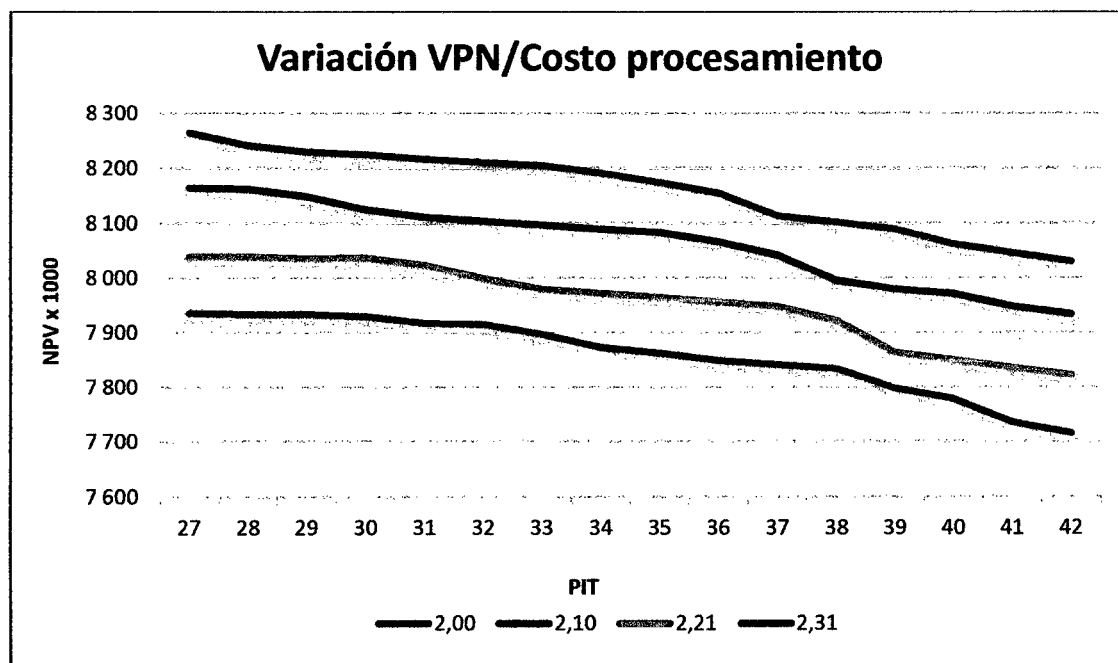


Figura 34: VPN vs costo planta

3.7.5.3. RECUPERACIÓN

Las recuperación dependen del proceso o tratamiento que se le dé al material proveniente de mina hasta convertirlo en un dore. Al realizar un análisis de variación en las recuperación de los procesos es posible contestar a la pregunta de ver si vale la pena invertir en nuevos estudios metalúrgicos que mejoren esta variable, lo que influirá en el VPN de cada pit y además observar si existe cambio o no en la forma de la curva VPN lo que se traduciría en un cambio de posición de los pits en estudio con respecto a él o los nuevos pits con máximo VPN.

Para este caso se decidió observar el comportamiento que se tendría al variar las recuperaciones para el oro desde 60%, pasando por la recuperación base de 66%, hasta llegar a una recuperación de 70% (ver anexo tabla 13), los contaminantes de alta concentración pueden ser penalizados, un claro ejemplo es el arsénico.

Los resultados obtenidos son los siguientes gráficos de la figura 35 y 36.

.

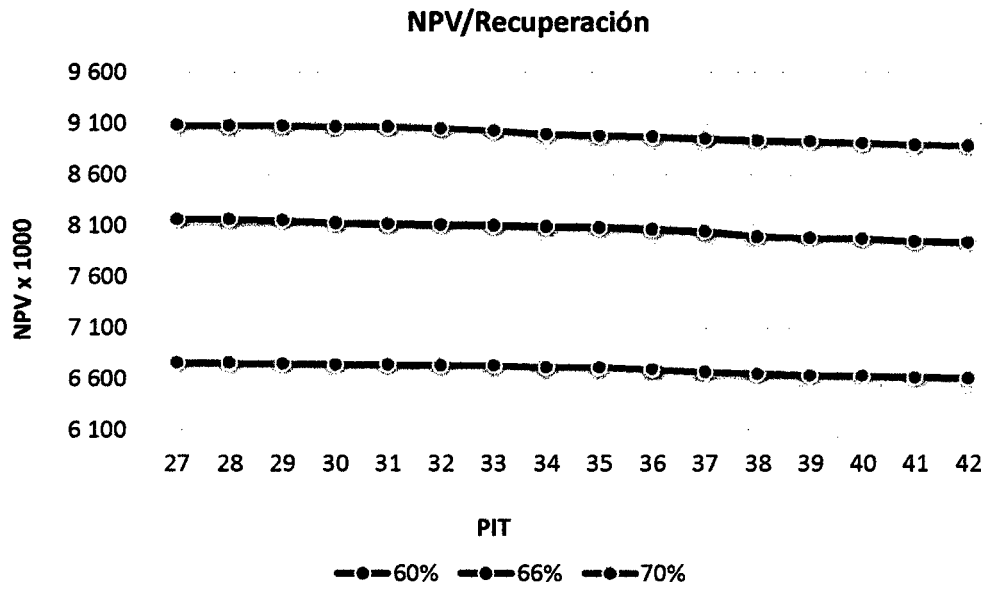


Figura 35: VPN vs recuperación

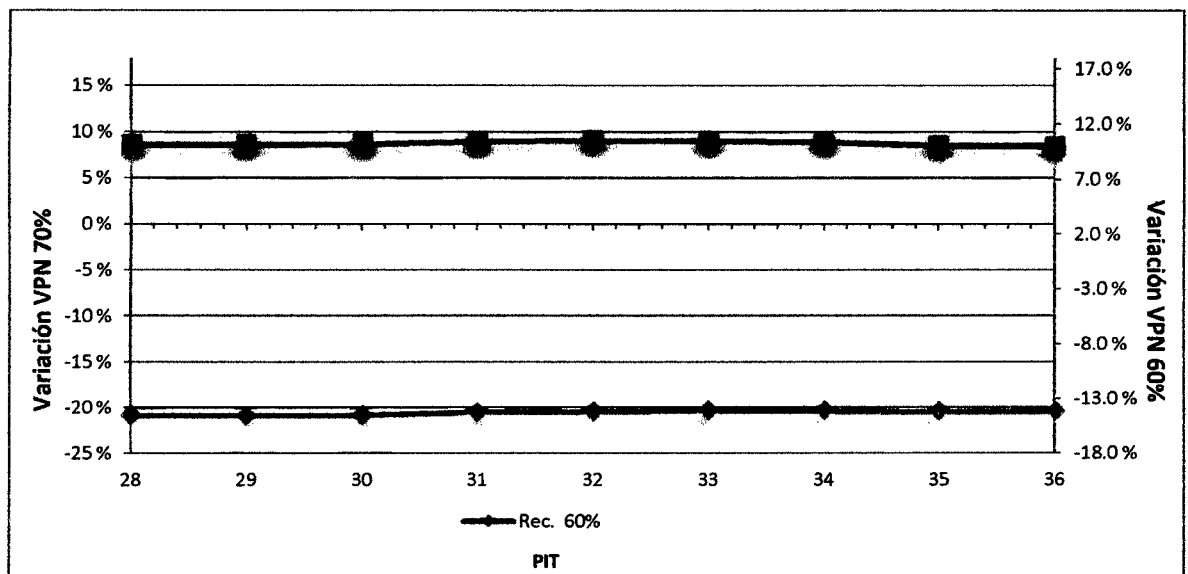


Figura 36: Variación VPN vs recuperación

Al igual que para la variación del factor costo, se observa que la variable recuperación no genera cambios en la forma de la curva VPN/PIT. Sin embargo

se manifiestan cambios en el VPN que van desde 20% a 21% para recuperación de 60% y de 9 % hasta un 11 % de aumento en el VPN para una recuperación de 70%, que traducido a unidad monetaria representa cerca 14,12M \$, como máximo, posibles de invertir en nuevos estudios metalúrgicos con el fin mejorar la recuperación.

3.7.5.4. VARIACIÓN EN ANGULO DE TALUD

La variación de esta variable posee una gran influencia ya que cualquier aumento o disminución en el ángulo de talud del pit final hará cambiar la cantidad de estéril a remover por tonelada de mineral, lo que influirá en costos en seguridad geomecánica, los costos de explosivo a utilizar (por ejemplo, si se debiera usar voladura controlada) y en los costos del material estéril que se debe remover.

Por lo anterior, la decisión de variar el ángulo de talud debe merecer un profundo estudio geotécnico identificando que sectores de la mina permiten una variación y en cuanto deberían cambiar, considerando desde parámetros sísmicos hasta litológicos, haciendo además notar que las contingencias que ocurren a lo largo de la vida de la mina hacen que todo este proceso sea dinámico en el tiempo.

Solo con el propósito de dar a conocer la importancia de esta variable se efectuó un análisis grueso, ya que representaría un escenario totalmente distinto en la optimización del tajo, por ende su geometría, representando variaciones en los costos totales, entregándonos finalmente una serie de pits con formas distintas a

los analizados (figura 37) lo que no los haría comparables. De todas formas se ha hecho un análisis para poder observar cuanto más o cuanto menos podría ganar ante una variación del ángulo, recalcando que este cambio además de merecer los estudios antes mencionados pasa a formar parte de otro caso para análisis, que podría por ejemplo, servir para estimar cuanto podría invertir en estudios geomecánicos con el fin de aumentar el ángulo de talud en función de un aumento del VPN del nuevo pit esperado, o si vale la pena reducir el ángulo con el fin de disminuir los costos asociados a este factor.

Las nuevas variaciones para el caso en estudio son mostradas en la tabla 14 y obteniendo la variación VPN para distintos ángulos tabla 15.

Tabla 14: Variaciones de ángulos para distintos casos

CASO	ANGULO	
	Sector W	Sector E
Base	45°	NE
Aumento	48°	SW
Disminución	42°	NW

Tabla 15: Variación ángulo de talud

Caso	Máximos VPN	Material a Mover (tnxM)	VPN Worst (US\$xM)	VPN Best (US\$xM)	Razon E/M
Base	27	25 540 672	81 641 996	87 621 663	0,47
	42	35 620 239	79 333 601	89 154 864	0,48
Aumento	27	25 361 163	80 149 507	85 652 922	0,50
	42	36 553 069	77 790 866	87 231 850	0,53
Disminución	27	24 977 218	83 830 225	89 902 112	0,41
	42	34 650 571	81 415 818	91 551 174	0,42

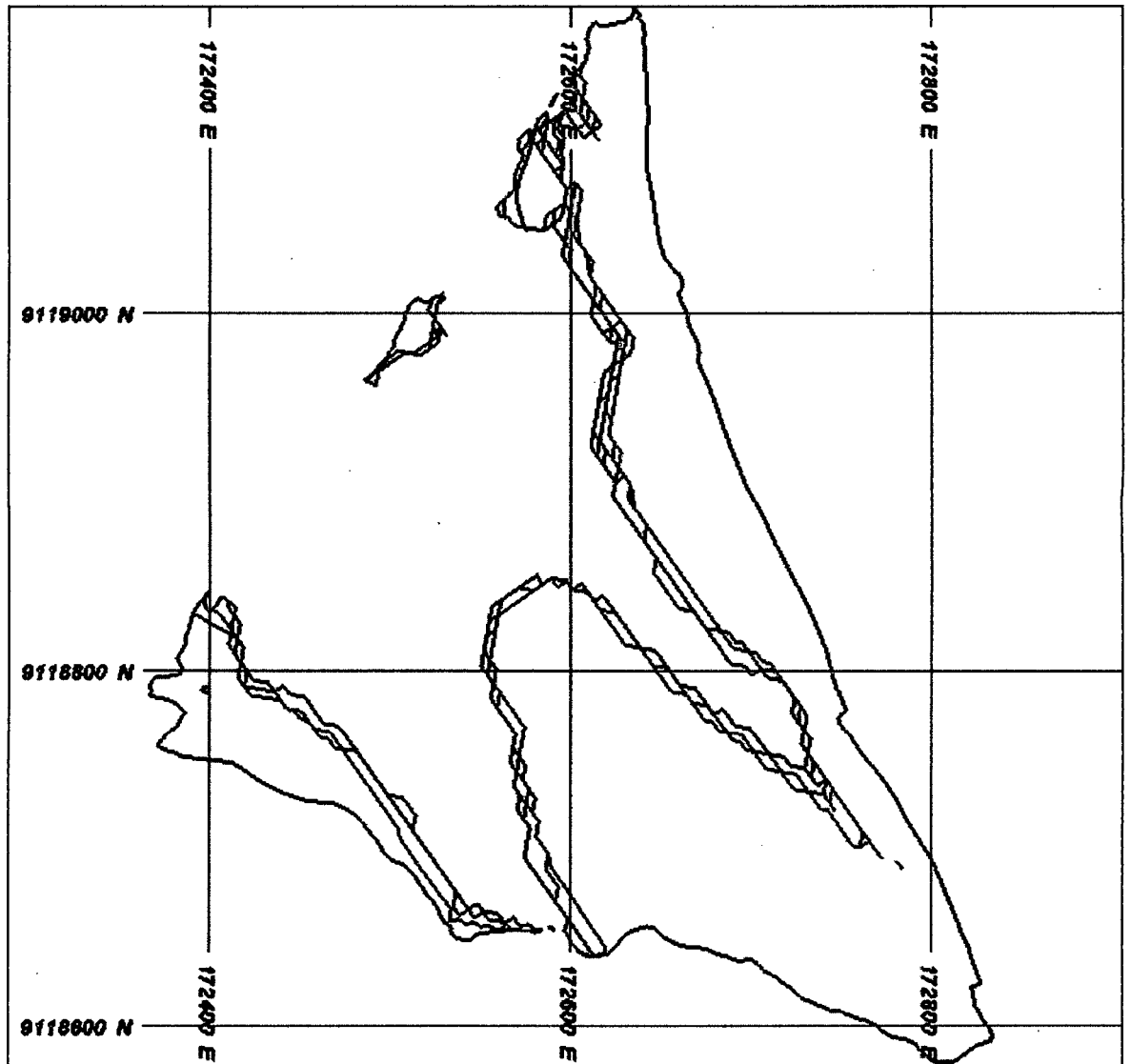


Figura 37: Contornos de pit final a diferentes ángulo de talud

El aumento de ángulo de talud del pit final permitirá reducir (quizás no tan marcadamente en el presente caso en estudio) la razón estéril/mineral, con el consecuente aumento en el valor presente neto y una disminución en la vida operacional. Para el caso de disminución del ángulo de talud, el comportamiento también obedece a la lógica esperada.

Por lo anterior es que si existen posibilidades reales de variar el ángulo de talud del pit final, las herramientas computacionales Whittle y Gemcom nos permiten realizar una rápida visión del comportamiento que tendrían nuestros pits, pudiendo realizar una evaluación a priori, tanto técnica como económica, de las alternativas consideradas, sirviendo como base para la decisión de modificar esta variable.

3.7.5.5. SELECCIÓN DEL PIT FINAL

De acuerdo a los análisis realizados es posible determinar cuál será el pit final óptimo que, utilizaremos en las siguientes etapas del presente trabajo.

Debemos recordar que el objetivo de encontrar el pit final será establecer la envolvente que limitará todo el material que es técnica y económicamente conveniente extraer, de acuerdo a las variables que envuelve el negocio minero, considerando todas las posibles contingencias y observando el comportamiento de las variables ante ellas.

En la tabla 16 se presentan un resumen de los resultados obtenidos en los análisis anteriores.

Tabla 16: Resumen resultados

Variable analizada	Pits seleccionados
Caso Base	27 al 42
Material a mover	29 al 40
Razón E/M	30 al 38
Tiempo	27 al 42
Precios	27 al 40
Costos	35 al 40
Recuperación	35 al 40

Considerando todos los intervalos seleccionados se puede establecer que el pit final se encontrará dentro de los pits 30 al 40 que representan al intervalo con menos variación frente a los análisis realizados, por lo que se deberá realizar un análisis comparativo para cada uno de estos 6 pits (35-36-37-38-39-40).

Un resumen de las características de estos pits preseleccionados es presentado en la tabla 17.

Tabla 17: Selección de pit final

	PITS SELECCIONADOS					
	35	36	37	38	39	40
VPN Mejor Caso (US\$xM)	88,69	88,89	88,96	89,08	89,12	89,13
VPN Peor Caso (US\$xM)	80,84	80,66	80,42	79,95	79,80	79,71
Material Mina (tnxM)	29,70	31,31	31,99	33,52	34,28	34,54
Material Lixiviación (tnxM)	20,53	21,55	21,97	22,62	23,06	23,30
Razón E/M	0,45	0,45	0,46	0,48	0,49	0,48
Vida (años)	5,84	6,12	6,22	6,39	6,49	6,54
Ley Media (%)	0,42	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39

Para seleccionar el pit final debemos centrarnos en los pits que tengan una menor variación de VPN para ambos casos, y esos son los pits 36, 37 y 38, pero dada la poca diferencia que existe entre ellos es recomendable optar por el pit 38 para continuar con las posteriores etapas de planificación por las siguientes razones:

- El pit 38 deja abierta la posibilidad de expansión hacia los pits mayores en caso de continuar con el proyecto a futuro.
- El pit 38 representa menor cantidad en la relación de estéril mineral 0,48 de, al compararlo con el pit 39 y 40 presenta 0,8 M de toneladas menos.
- El pit 38 presenta una poca significativa variación de VPN al compararlo con los pits 35 y 37 (-0,20 % y - 0,12% respectivamente).

Por lo tanto, en base al análisis comparativo realizado, se ha procedido a seleccionar como pit final al pit número 38 y será la envolvente base para la posterior operativización y posterior confeccionamiento del plan de consumo de material a través del diseño de fases y un programa anual de extracción.

Es importante señalar que aparte de los análisis teóricos presentados, la experiencia y conocimientos del personal encargado de la selección del pit final, y en general de todas las personas relacionadas en la planificación y toma de decisiones en el negocio minero serán elementos claves en este proceso, introduciendo las filosofías corporativas que ayudarán a alcanzar los objetivos previamente trazados. No se debe olvidar que este proceso es dinámico en el tiempo, por lo que debe estar sujeto a constantes revisiones que ayuden a obtener un sistema controlable, sustentable y armónico.

3.8. ELECCIÓN DE FASES Y CONSTRUCCIÓN DE PROGRAMA DE PRODUCCIÓN

3.8.1. INTRODUCCIÓN

A diferencia de contar con el pit final y el problema del secuenciamiento de bloques para resolver el problema integrado de planificación de largo plazo considera no sólo la definición de qué bloques forman o no parte de la envolvente económica, sino también cuando extraer estos bloques, la introducción del factor tiempo en el secuenciamiento ordenado que cumpla con las restricciones técnico-operacionales y que además entregue los mejores resultados de rentabilidad de las variables que controlan el negocio minero repercutan en la menor forma posible, es la próxima meta que debe estar para el presente trabajo.

Para la obtención de esta secuencia o fases no existe ninguna técnica que permita asegurar que la ruta elegida es la correcta u óptima, existiendo para ello diversos algoritmos o criterios que permiten establecer un consumo lo más acorde con las condiciones establecidas.

Como vimos anteriormente dos tipos de estrategias para el consumo de reservas (mejor y peor), pero ninguna de ellas es realmente práctica, aunque si contendrán dentro de sus límites cualquier otra estrategia que sea aplicable. Por ello se debe buscar la secuencia óptima para la extracción de material, la que se encontrará dentro de aquellos límites.

Para establecer esa secuencia óptima aplicaremos el nuevo algoritmo denominado MILAWA establecida en Whittle y que consiste básicamente en una herramienta de planificación estratégica diseñada específicamente para largo plazo, determinando lo que se debe explotar de las áreas accesibles en cada período de la vida de la mina buscando de esta manera encontrar el mejor VPN de acuerdo a ciertos parámetros previamente establecidos como retrasos o adelantos entre fases, cantidad máxima de bancos a explotar por períodos, límites y equilibrios entre procesos.

Típicamente para la construcción del plan de producción se considera un número mínimo y máximo de bancos que deben ser extraídos de una fase para que la fase siguiente comience a ser extraída y un número máximo de bancos que pueden estar en explotación en una fase por período.

3.8.2. DISEÑO DE FASES

El diseñar fases es flexibilizar la programación de la producción de modo de disponer de más frentes de trabajo para extraer material. En otras palabras es que la primera fase contenga suficientes reservas hasta que la segunda fase pueda ser productiva, de modo de atenuar si existieran problemas de tipo: geo-mecánicos, problemas operacionales, fallas en la estructura de recursos o geotécnicos en la nueva fase.

Esto implica que la razón estéril/mineral de la fase que comienza a entrar en producción debe ser lo suficientemente baja y continua para mantener una continuidad operacional.

Una descripción básica de los pasos involucrados en la planificación de la fase por (Mathieson, 1982), antes de iniciar el trabajo de diseño preliminar algunos principios deben ser tomadas considerando:

- La máxima cantidad probable del ritmo de minado de mineral y desmonte a extraer requerida en una fase dada.
- El tamaño y el tipo de equipo que se utiliza. Esto determina el requerimiento mínimo del ancho necesario de minado.
- Trabajo apropiado, interrampa y ángulos de talud final.

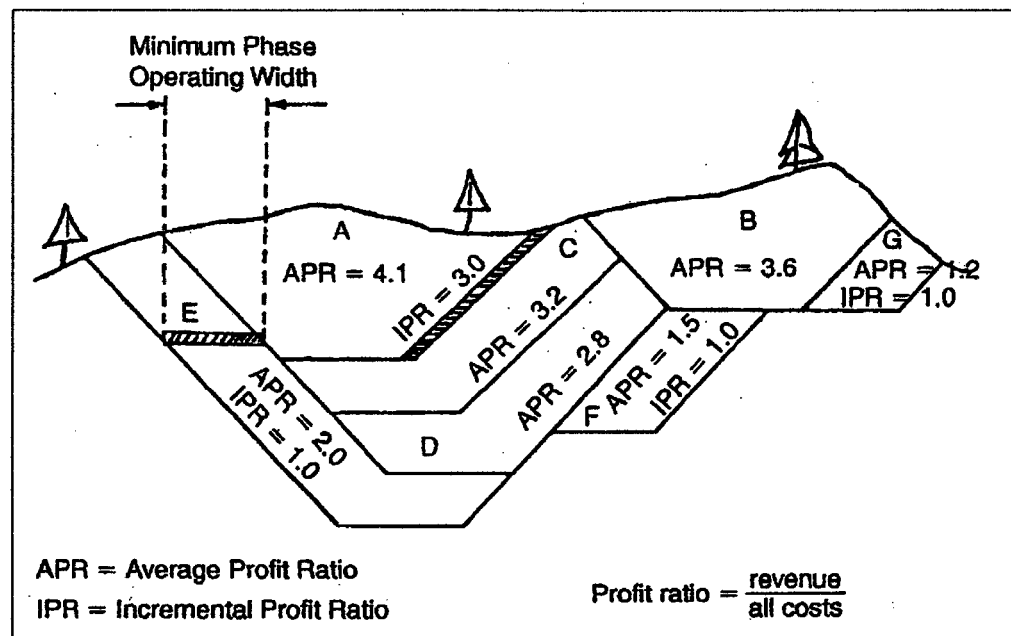


Figura 38: Secuencia del pit en orden decreciente (Mathieson, 1982)

Hustrulid W. & Kuchta M. (2006). "Open Pit Mine Planning & Design"

La figura 38 muestra una representación bidimensional de las fases utilizadas para extraer una reserva de mineral (Mathieson, 1982). Los ingresos de la secuencia de extracción de esa fase que tiene la más alta tasa de beneficios promedio (APR) a la más baja. En este caso se procede en orden alfabético de A a G. Está implícito en un pit que las fases se pueden extraer en forma consecutiva o simultánea, con sujeción a la regla de que una fase externa no se puede adelantar a una fase interna este debe ir el orden de mayor a menor en cualquier punto en el tiempo.

Una vez completado, los diseños fase se transfieren a los planos por banco tal como se muestra en la figura 39. Son evaluados banco por banco en tonelaje y leyes. Un inventario de tonelaje – ley en cada fase definido lógicamente la secuencia de desarrollado el pit que estará disponible..

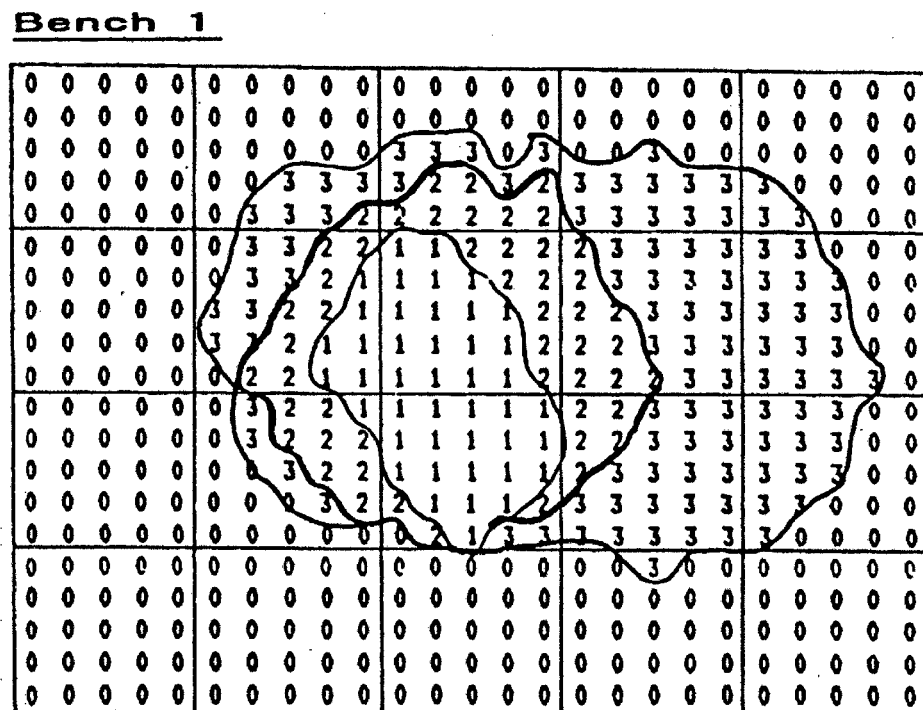


Figura 39: Secuencia banco por banco

Hustrulid W. & Kuchta M. (2006). "Open Pit Mine Planning & Design"

3.8.3. SELECCIÓN DE FASES DE EXPLOTACIÓN

Se denomina fase, pushback, expansión, secuencia de explotación, o estrategia de consumo de reservas, a la forma en que se extraen los materiales desde el tajo, durante el período comprendido entre el inicio de la explotación hasta el final de ella (pit final).

Las selección de fases se determinan de manera secuencial en un proceso que tiene como objetivo de dividir las reservas del pit final en unidades más manejables donde se aplicara los mismos algoritmos para la envolvente económica en las diversas etapas y además que cumplirán con ciertos requisitos técnico-operativos. con el fin de extraer el mineral en la forma más eficiente posible de modo de alcanzar el máximo beneficio.

A demás la secuencia de explotación queda dada por la tendencia geométrica que muestra la serie de pits anidados figura 40. Desde esta serie se deben elegir algunas envolventes que cumplan, de la mejor manera posible, las restricciones operacionales mencionadas por Mathieson. Estas envolventes deben ser suavizadas, eliminándose contornos difíciles de incorporar al diseño y fondos de pequeñas dimensiones y agregándose los accesos necesarios.

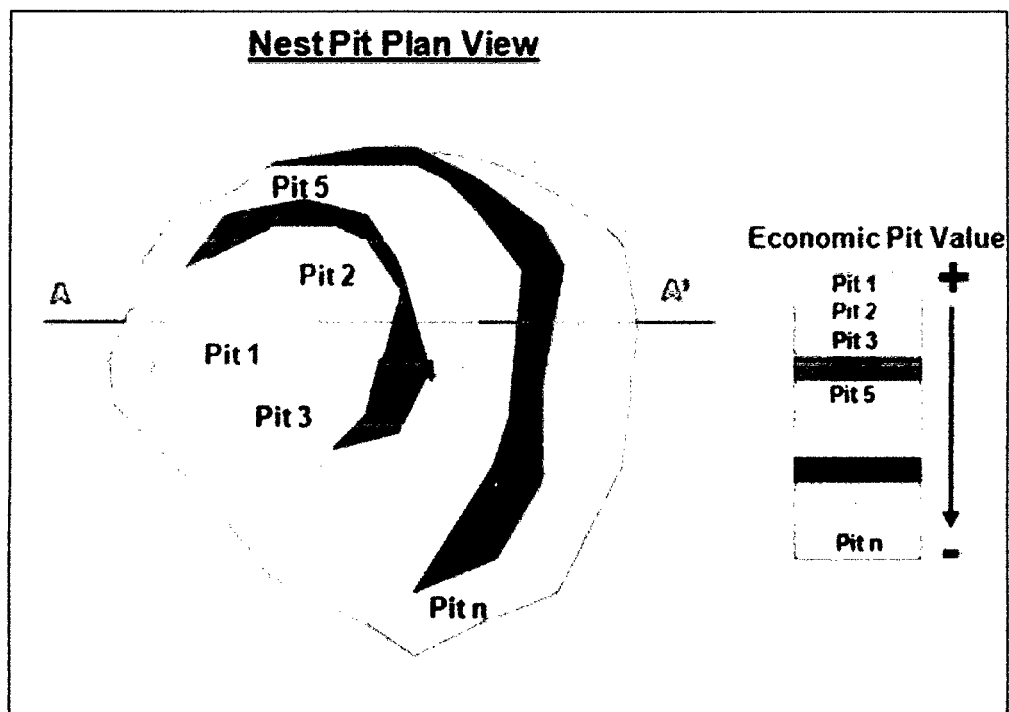


Figura 40: Ancho mínimo de la secuencia

Fuente: Curso básico 2009 Gemcom Whittle

El número de fases o expansiones están estrechamente relacionadas al tamaño del yacimiento, vida del proyecto, parámetros de diseño y políticas de la empresa.

Existen varios criterios y técnicas para obtener una selección adecuada de la secuencia de fases.

➤ **VARIACIÓN DE LEY DE CORTE DE DISEÑO:** Cada fase es construida exigiéndole una ley mínima que ira decreciendo en el tiempo hasta alcanzar la ley crítica con la que fue diseñado el pit final. Por lo tanto el tajo de menor tamaño tiene asociada una ley de diseño mayor y el tajo final tendrá la ley de diseño más baja.

➤ **VARIACIÓN DE PRECIOS:** Consiste en la generación de una serie de pits a través de la variación del precio(s) de producto(s). Esta técnica muy utilizada se basa en maximizar la recuperación del metal fino del yacimiento y consiste en diseñar tajos intermedios al pit final utilizando la misma metodología de diseño del pit final introduciendo variaciones de precio de venta del producto final (Metal). Estos precios son decrecientes en el tiempo y los pits generados son anidados, es decir, un pit de mayor precio es envuelto en su totalidad por otro de menor precio y así sucesivamente hasta llegar al pit final.

Del pit óptimo se generan los pits a diferentes precios de extracción siendo estas las fases de minados, los cuales son ajustados en función a planes estratégicos y/o operativos.

Esta es la metodología empleada, variaciones total de los precios, es decir, los precios de venta del producto final (metal) del oro y plata, En el caso de Minaspanpa son considerados 02 fases los cuales fueron basados en pits de 860 y 1250 Us\$/oz respectivamente. Con esto se obtiene una secuencia de 2 tajos en que estos tajos tienen asociados el precio venta del producto (VPN) más bajo (cada bloque tiene una mayor exigencia para ser extraído), hasta llegar al VPN pronosticado para el largo plazo, el cual corresponde al pit final obtenido.

La idea en la selección de las fases es generar el máximo de beneficio económico en la primera fase de modo de amortizar en forma rápida el capital invertido. Por último la fase final debe ser capaz de entregar cierto monto de utilidades compensadas con el factor cierre de mina.

Lo anterior es con el objeto cumplir con los requisitos técnicos-operacionales de mantener un equilibrio de movimientos de materiales entre la mina y la planta, preferenciando la constante alimentación a planta de acuerdo a la capacidad máxima establecida, con el fin de cumplir con las futuras obligaciones en la venta del producto y no tener periodos en que solamente exista remoción de estéril.

3.8.4. LAS RESTRICCIONES

Dentro de las consideraciones técnicas se ha establecido un desfase máximo de 6 bancos, con el fin de poder trabajar durante la vida de la mina simultáneamente con dos fases para mantener el ritmo de producción establecido para la planta que es de 3,6 Millones de tn/año.

Pensar en trabajar las fases en forma independientes unas de otra se contrapone con la necesidad operacional de mantener esta tasa de producción. Lo anterior es importante destacarlo porque al realizar una explotación independiente, en el inicio de cada fase existirán periodos donde la explotación mina sólo removerá desmonte para poder dejar mineral descubierto, provocando variabilidad en el ritmo del material procesado, causando un gran desequilibrio en el sistema, ya que para conseguir la producción óptima se deberá incurrir en un mayor número de equipos con todos los costos que se asocian a este hecho y que por los problemas físicos que esto acarrea (espacios mínimos requeridos para la operación) no será capaz de cumplir.

También se debe pensar que tener una planta trabajando a un 30, 40 o 60% de su capacidad nominal establecida provocará un gran problema económico debido a esta inutilización.

La elección de fases deberá presentar un horizonte mínimo por cada fase de 2 años y máximo no mayor a 4 años de vida, con excepción de la última que podrá extenderse por sobre este límite ya que cabe la posibilidad de extender la duración del proyecto si la cantidad de reservas explotables aumentara.

Dada la cantidad de años que tiene de duración el pit final y los máximos horizontes de planificación permitidos por fases, el número máximo de ellas será de dos fases.

Al observar el resultado de la optimización para los 86 pits obtenidos con las condiciones bases (tabla 8) y considerando las restricciones explicadas en los párrafos previos se ha seleccionado como fase 1 el pit 16 que posee una menor duración dentro de los posibles (15 al 17) con un alto VPN que varía en un pequeño porcentaje con respecto a los demás.

Luego se efectúa una selección de los cuales resultaron seleccionados los pit 16 y 38 que no sobrepasan los cuatro años de duración. La razón de seleccionar estos pits es que se puede conseguir el equilibrio de materiales deseado entre planta-mina dentro de los periodos establecidos, además de otorgar altos VPN (tabla 18 y 19).

Tabla 18: VPN selección de fases

Fases	VPN & USIM
15-38	80,357
16-38	80,378
17-38	80,483

Tabla 19: Fases seleccionadas

Fase	Pto	Mineral	Aut	Fino	Estéril	Total	Stpp	Vida
		tn	Grade	Ag tn	tn	tn	Ratio	Años
1	16	13 184 745	0,54	4 738 202	6 454 803	19 639 548	0,49	3,97
2	38	9 438 835	0,19	1 183 630	4 445 466	13 884 301	0,47	2,42
Pto final		22 623 580	0,39	5 868 104	10 900 269	33 523 849	0,48	6,39

3.8.5. PLAN DE MINA DEL PIT ÓPTIMO

El desarrollo de un plan minero es una actividad enormemente desafiante e interesante. Los ingenieros han intentado durante décadas crear programas computacionales los cuales puedan definir secuencias de extracción óptimas durante la vida de la mina. Personalmente, considero que debido a que el medio tecnológico y económico en que operamos se encuentra en constante cambio, no es posible en cualquier punto del tiempo definir un plan óptimo que se ajuste a las condiciones futuras, más allá de lo que se requiere, existe un plan flexible, el cual se puede adaptar a cualquier cambio, y tiene la capacidad de llevar a cabo rápidamente estrategias de planificación que se ajusten a las condiciones futuras que se vayan dando.

Típicamente para la construcción del plan de producción se considera un número mínimo y máximo de bancos que deben ser extraídos de una fase para que la fase siguiente comience a ser extraída y un número máximo de bancos que pueden estar en explotación en una fase por período.

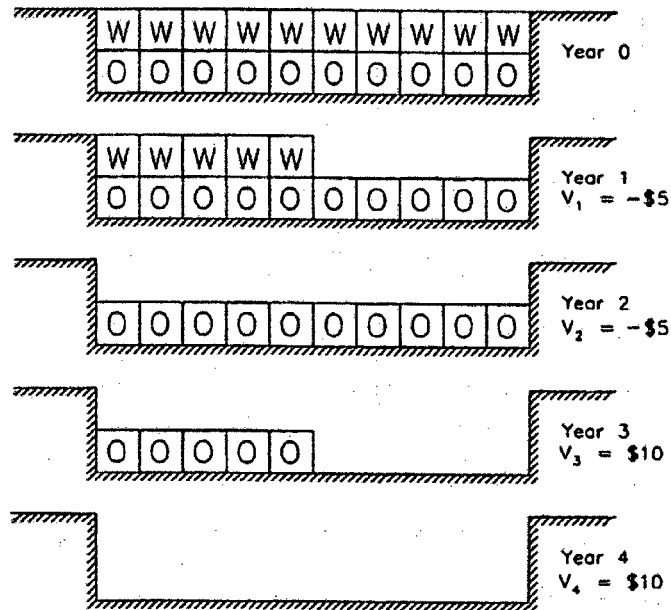
En el caso de planificación de mina, programación de la producción es un problema espacial de determinación de la extracción de unidades discretas de mineral y residuos que se caracterizan por su posición y contenido. Todo el área a considerar para minería es abarcada por una matriz 3D que se conoce como un modelo de bloques con cada elemento de la matriz, tener volumen, posición y contenido mineral estimado. El problema es determinar el orden en que se eliminará estos bloques sobre una serie de períodos de tiempo de producción tal

que el valor minado del depósito se maximiza. La producción se ve definida por dos clases de limitaciones: restricciones que limitan la secuencia en que bloques pueden ser extraídos en relación con otros y producción que definen los objetivos de calidad del producto y la cantidad en forma ordenada. En el problema de tajo abierto, las limitaciones de orden corresponden a los límites permisibles pendiente; la extracción de un bloque cubierta por otros bloques requiere que algunos de estos bloques también deben eliminarse.

El siguiente ejemplo, tomando de Hustrulid y Kuchta (2006), pone de manifiesto la importancia que tiene una adecuada selección del ritmo de explotación, expresándose el parámetro económico a través del valor actual neto.

En la Figura 41 se muestra un conjunto de 20 bloques (10 de mineralización = 0 y 10 de estéril = W) que van a ser explotados. Se asume que se van a extraer cinco bloques por año, independientemente de si se trata de estéril o mineral, con un valor neto de 2\$, por bloque mineralizado y un costo de extracción del bloque de estéril de 1\$. El costo total de la extracción del estéril sería, pues, de 10\$ y el beneficio total de 20\$. Si la extracción de todo el conjunto fuese inmediata, se obtendría un beneficio de 10\$, lo que es, evidentemente, imposible. Por ello, pueden considerarse una serie de secuencias mineras diferentes, con influencias en el beneficio, como se verá a continuación, también diferentes. Para aplicar el valor actual neto en las diversas opciones, se tomare una tasa de interés del 10%.

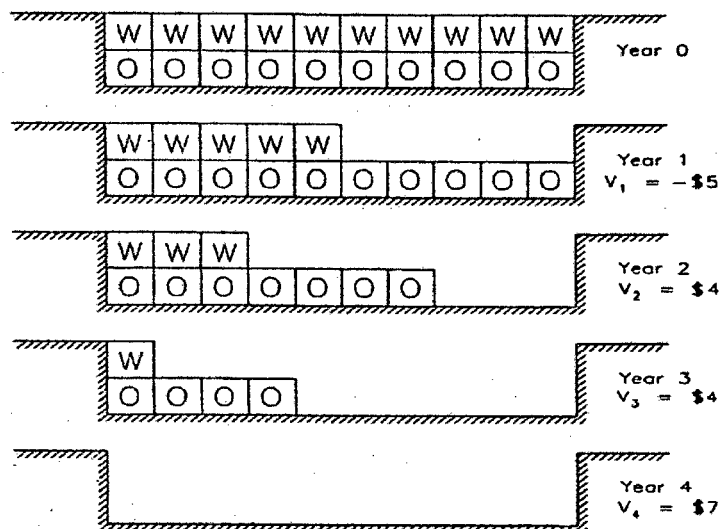
Opción 1. Primero se extrae todo el estéril y, posteriormente, la totalidad de la mineralización. El valor actual neto para esta secuencia sería:



Figuras 41: Ejemplo para aplicar la secuencia minera

$$\text{VAN} = \frac{-\$5}{(1,10)^1} + \frac{-\$5}{(1,10)^2} + \frac{\$10}{(1,10)^3} + \frac{\$10}{(1,10)^4} = \$5,66$$

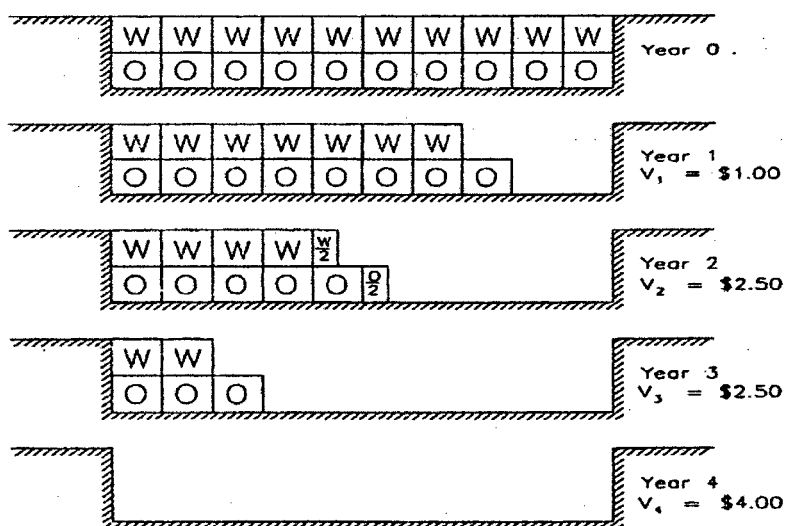
Opción 2. Esta alternativa requiere extraer 5 bloques de estéril el primer año. En los años 2 y 3 se extraerán 3 bloques de mineralización por cada 2 bloques de estéril extraídos. Al último año le corresponden, por tanto, 1 bloque de estéril y 4 de mineralización (Fig. 42). El valor actual neto para este diseño secuencial sería:



$$VAN = \frac{-\$5}{(1,10)^1} + \frac{\$4}{(1,10)^2} + \frac{\$4}{(1,10)^3} + \frac{\$7}{(1,10)^4} = \$6,56$$

Figuras 42: secuencia de extracción minera opción 2

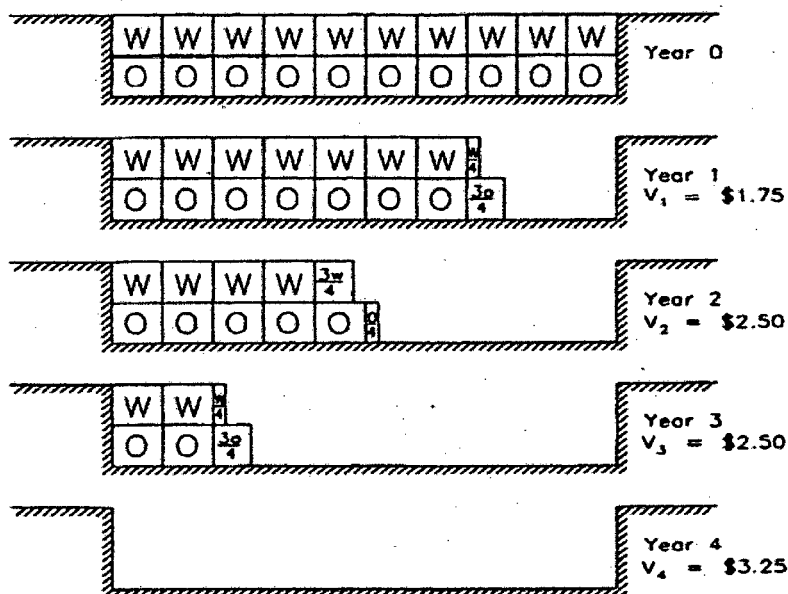
Opción 3. En este caso, la extracción se realiza de tal forma que se mantiene siempre un bloque de estéril más que el de mineralización (Fig. 43). El valor actual neto será:



$$VAN = \frac{\$1}{(1,10)^1} + \frac{\$2,50}{(1,10)^2} + \frac{\$2,50}{(1,10)^3} + \frac{\$4}{(1,10)^4} = \$7,59$$

Figuras 43: secuencia de extracción minera opción 3

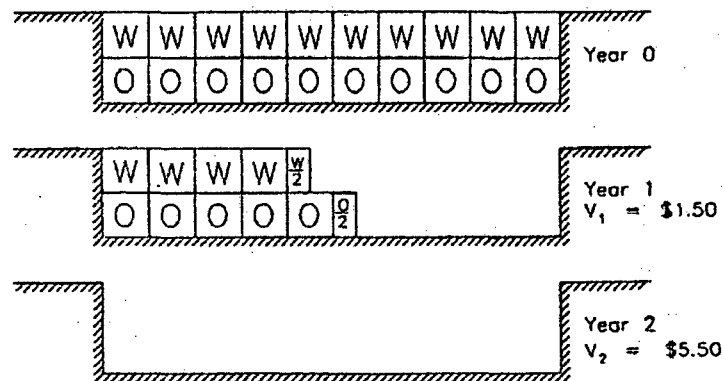
Opción 4. La secuencia de esta opción se puede observar en la figura 44. Es parecida a la anterior, sin embargo el valor actual neto es diferente:



$$VAN = \frac{\$1,75}{(1,10)^1} + \frac{\$2,50}{(1,10)^2} + \frac{\$2,50}{(1,10)^3} + \frac{\$3,25}{(1,10)^4} = \$7,76$$

Figuras 44: secuencia de extracción minera opción 4

Opción 5. Supóngase ahora que se dispone la maquinaria suficiente para doblar la producción, esto extraer todo el material en dos años. Considérese que incremento en el costo de extracción de estéril es del 10% (nuevo costo de extracción = 1,10\$/bloque) y que los beneficios en la explotación de los bloques de mineral disminuyen un 5% (nuevo beneficio = 1,90\$/bloque). Considerando un método de extracción semejante al de la opción anterior, se tendría un valor actual neto de:



$$VAN = \frac{\$2,5}{(1,10)^1} + \frac{\$5,5}{(1,10)^2} = \$6,82$$

Si la extracción en dos años no generase costos adicionales, el valor actual neto sería:

$$VAN = \frac{\$3,5}{(1,10)^1} + \frac{\$6,5}{(1,10)^2} = \$8,55$$

Con lo que esta segunda posibilidad de la quinta opción sería la más favorable, como se puede observar con este simple ejemplo, el diseño de una adecuada secuencia de extracción puede tener una influencia determinante en el beneficio económico de la explotación.

En esta parte, se realizará la construcción del plan de producción bajo las opciones de Whittle. Una vez seleccionado el conjunto de fases se debe confeccionar el plan minero, el cual será efectuado aplicando el algoritmo de Milawa, que consiste básicamente en la obtención de una secuencia de explotación de bloques mediante la asignación de parámetros como fases seleccionadas, desfases (número de

bancos mínimos y máximo entre fases), máximo número de bancos a explotar por períodos.

Se pueden introducir una serie de restricciones en la operación que respetará el algoritmo Milawa cuando busque heurísticamente la mejor secuencia de explotación. Éstas son: las distancias mínima y máxima entre las fases, medidas como el número de bancos entre ellas; y el número máximo de bancos que se pueden extraer en cada fase por periodo.

3.8.6. LAS RESTRICCIONES

Financiero: Se refiere al resultado financiero neto esperado en cada mes, luego de considerar los ingresos por producción del metal y descontando todos los costos involucrados en el proceso productivo. La tasa de descuento utilizada es de 10% anual.

Tasa de mineral: Se refiere a la cantidad de mineral que se puede trasladar al pad, esta restricción está dominada por el área disponible de riego asumiendo un período de riego de 45 días por área entregada a planta. En esta restricción se asumirá la disponibilidad permanente de nuevas áreas de riego, entonces, la restricción de mineral llevado al pad estará regido por el caudal de riego dimensionado en las instalaciones de bombeo y el circuito ADR. Por lo tanto, se procurará una tasa constante. El Stripping Ratio (SR) se encuentra manejado implícitamente al haber fijado el tonelaje de minado total y el requerimiento mínimo de mineral al pad de lixiviación.

Tasa de producción: Puede ser definida en términos de mineral extraído, metal producido, o minado total. En nuestro caso se ha establecido el tonelaje de roca total minado mensual de 1 200 000tn en base a la capacidad proyectada de excavadora de 360tn/hr.

Considerando las limitantes técnico operacionales. Dentro de estas limitantes hemos considerado las siguientes:

- Mínima cantidad de bancos en desfase : 2
- Máxima cantidad de bancos en desfase : 5
- Máxima cantidad de bancos a explotar por período: s/restricción

Estas restricciones fueron establecidas para permitir un armónico trabajo operacional, para privilegiar la alimentación a planta al inicio de nuevas fases dejando mineral a la vista en esos períodos

El modo usado para este caso en estudio fue Milawa VPN, donde la estrategia seleccionada a partir de las 2 fases fue condicionada por las siguientes exigencias mostradas en la tabla 20.

Capacidad Máxima Mina	14,4M/año
Capacidad Máxima Planta	3,6 M/año
Máxima Cantidad Fino	1,26 M/año
Ley de Corte	0,123 gt/tn

Tabla 20: Datos de entrada Milawa VPN

Con este plan minero se pretende explotar el yacimiento hasta los límites del pit final seleccionado, de acuerdo a las fases elegidas, consumiendo cada una de ellas a través del programa año a año dado por Milawa para así obtener el máximo beneficio económico y el equilibrio entre mina-planta-fino. El resumen del plan minero entregado por Milawa es mostrado en la tabla 21.

AÑO	TPD tn	MINERAL		Au gr/tn	Fino Au R: 66% tn	WASTE tn	TOTAL tn
		TPA tn					
1	10 000	3 600 000		0,53	1 258 805	1 206 831	4 806 831
2	10 000	3 600 000		0,51	1 210 097	2 128 390	5 728 390
3	10 000	3 600 000		0,44	1 041 401	1 639 846	5 239 846
4	10 000	3 600 000		0,30	724 442	1 718 900	5 318 900
5	10 000	3 600 000		0,22	534 362	1 543 321	5 143 321
6	10 000	3 600 000		0,20	481 378	1 396 517	4 996 517
7	3 879	1 396 533		0,69	638 285	901 242	2 297 775
TOTAL		22 996 533		0,39	5 888 770	10 535 047	33 531 580

AÑO	MATERIAL EXPLOTADO POR FASE		MATERIAL TRATADO POR FASE		NUMERO DE BANOS EXPLOTADOS POR FASE	
	F1 tn	F2 tn	F1 tn	F2 tn	F1	F2
1	4 419 024	387 807	3 366 069	233 932	14	9
2	4 435 813	1 292 577	3 069 729	530 268	6	6
3	3 452 709	1 787 136	2 686 899	913 102	5	5
4	2 529 720	2 789 180	2 048 010	1 551 989	6	6
5	1 030 012	4 113 309	841 028	2 758 972	12	12
6	1 877 445	3 119 073	1 219 971	2 380 028	15	15
7	1 899 243	398 532	1 075 143	321 389	12	14
TOTAL	19 643 966	13 887 614	14 306 849	8 689 680	70	67

Tabla 21: Resumen plan minero material explotado y tratado

En resumen, Milawa, el algoritmo comúnmente utilizado para realizar el secuenciamiento y agendamiento, bajo esta opción es posible no solo definir un mínimo de bancos explotados en la fase anterior, sino también un máximo de ellos (control del ángulo de trabajo). Además es posible controlar la velocidad de

explotación vertical, al definir una máxima de bancos explotados por una fase dentro del periodo terminado.

Caccetta y Hill (2003) muestran un enfoque para el problema de secuenciamiento de largo plazo. En cierto sentido, el modelo tiene mayor grado de detalle que la mayoría de los modelos de largo plazo en que los autores incorporan restricciones sobre la secuencia de extracción minera; las capacidades de movimiento mina, capacidades de procesamiento; leyes de alimentación a planta y concentrados; acopios; logística; y otros requerimientos operacionales como mínimo ancho de fondo de pit y máxima profundidad. Para resolver este problema, los autores usan una estrategia de branch-and-cut que consiste en una combinación de primera búsqueda de amplitud y una búsqueda de profundidad para encontrar una buena variedad de posibles programas de producción de pit. También realizan una elección de definición de variables y fijación de otras, e implementan una heurística basada en programación lineal para tener una buena limitación de sus soluciones.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGO

4.1.1. INTRODUCCIÓN

En evaluación de proyectos, los conceptos de riesgo e incertidumbre se diferencian en que, mientras que el primero considera que los supuestos de la proyección se basan en probabilidades de ocurrencia que se puede estimar, el segundo enfrenta una serie de eventos futuros a los que es imposible asignar una probabilidad. Los cambios que casi con certeza se producirán en el comportamiento de las variables de entorno harán que sea prácticamente imposible esperar que la rentabilidad calculada sea la que efectivamente tenga el proyecto. Por ello, la decisión sobre la aprobación o el rechazo del proyecto debe basarse, más que el VAN positivo o negativo, en comprender el origen de la rentabilidad de la inversión.

Con el objetivo de reducir el riesgo del proyecto, se realizó el análisis de sensibilidad de diversos parámetros que influyen en la estimación de los pits económicos. Dada la alta incertidumbre que existe en el control de las variables claves que inciden, tanto positiva como negativamente, en el pronóstico del proyecto. El escenario central de variables económicas involucradas en la elaboración del modelo económico de bloques sirve de línea base para la elaboración del análisis de sensibilidad.

4.1.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El propósito de este tipo de análisis es reducir el riesgo del proyecto Minaspampa, estos análisis permitirán identificar aquellas variables que tienen un mayor impacto en el resultado del valor presente neto ante cambios de uno o más de los valores, frente a distintos grados de error en su estimación, ayudando a decidir acerca de la conveniencia de realizar estudios más profundos de esas variables críticas.

Es importante señalar que la sensibilidad de un proyecto debe hacerse con respecto al parámetro incierto, La forma habitual de llevar a cabo los análisis de sensibilidad consiste en establecer unos cambios arbitrarios, por ejemplo del -20 %, -10 %, + 10 % y +20 %, Este análisis es entregado al analista y principalmente al inversionista con la finalidad de mejorar la información, el grado de variabilidad o el efecto de las variables que controlan el proyecto. Donde se podrá apreciar la variación de tonelajes de mineral, desmonte, ley promedio, y sobre todo del valor presente neto resultante del proyecto ante cambios en uno o más de los valores estimados en sus parámetros, Esto permitirá identificar cuáles son las variables más críticas y los puntos más débiles sobre los que se deben controlar la búsqueda de más información para determinar la probabilidad de que se alcancen esos puntos críticos.

Dentro de las variables sensibilizadas se encuentran las siguientes:

- Precio oro
- Costo mina
- Costo planta
- Recuperación
- Tasa de descuento

El análisis fue realizado variando, en forma negativa y positiva, las principales variables, cada una en forma independiente, arrojándonos para cada evaluación el VPN de cada simulación.

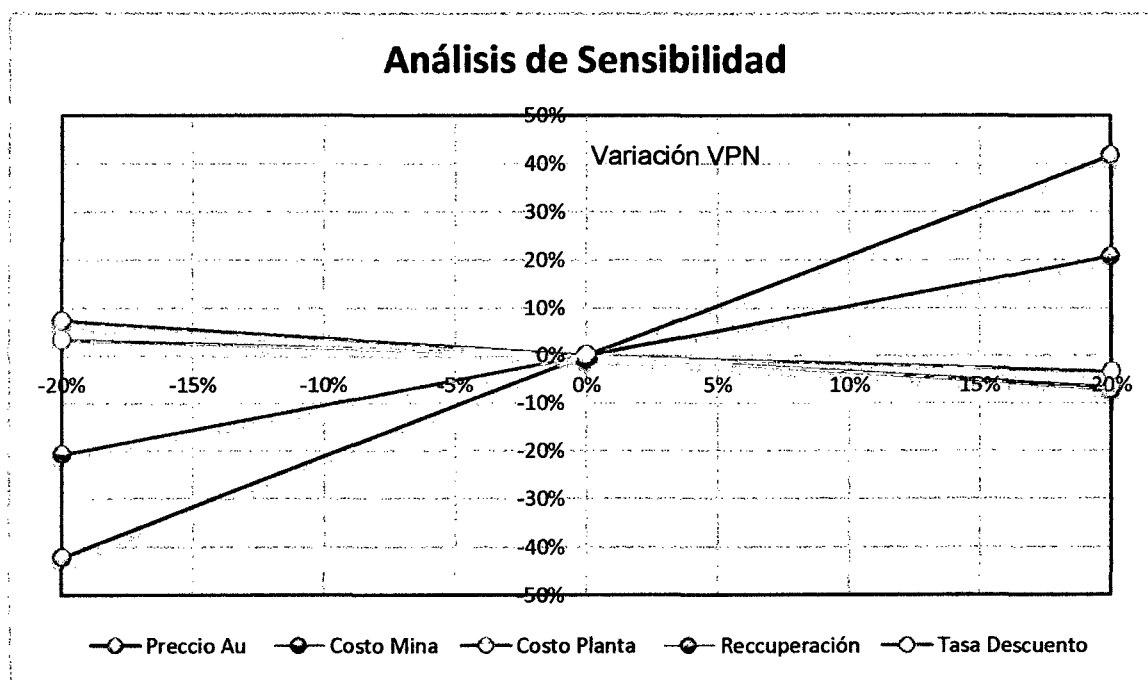


Figura 45: Análisis de sensibilidad

La figura 45, que muestra los resultados obtenidos, nos permite ver que la variable de mayor incidencia en este proyecto, como en la minería en general, es el precio del oro elemento principal, mostrando que con variaciones de $\pm 20\%$ en el precio del oro, el valor de VPN. Cambia cerca de un 42%. En segundo lugar, encontramos la variable recuperación que aunque su curva posee una menor pendiente que el precio del oro, es igualmente sensible el VPN frente a la variación de este parámetro.

Las barras horizontales de gráfico 46 nos informan sobre los posibles rangos de variación del valor presente neto y que además presenta la longitud de la barra diferentes valores que puede tomar VPN ante variaciones en la variable de riesgo.

En síntesis, el grado de influencia de cada variable en relación al VPN del proyecto, ordenado de mayor a menor con su respectivo índice de coeficiente de correlación es mostrado en la siguiente figura:

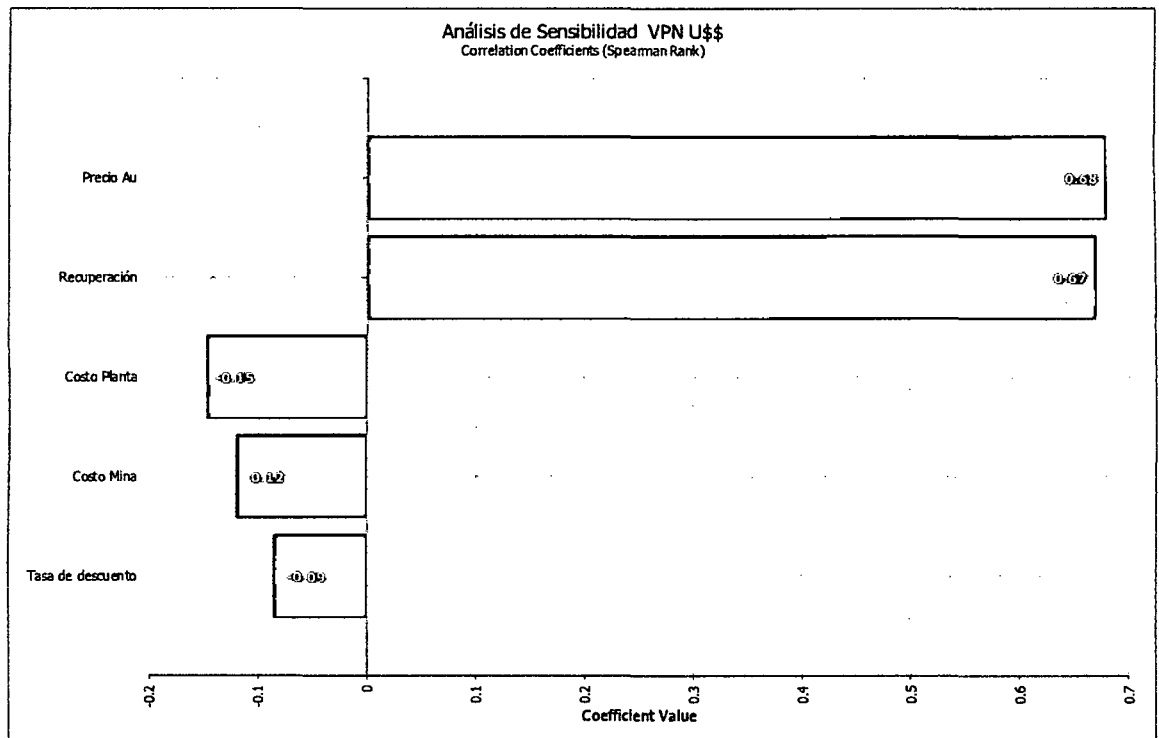


Figura 46: Análisis de sensibilidad tornado.

Estas medidas de control del coeficiente de correlación nos indican que las primeras variables representan mayor riesgo, precio del oro y recuperación metalúrgica frente al valor presente neto.

Se ha incluido la tasa de descuento dentro de las variables analizadas, dado que la elección de ésta en forma inadecuada entregará un resultado errado de la evaluación. Para la elección de una tasa correcta se debe considerar que este índice representa el precio que se debe pagar por los fondos requeridos para financiar el proyecto, al mismo tiempo que representa una medida de la rentabilidad mínima que se le exige al proyecto, de acuerdo con su riesgo.

4.1.3. RESULTADOS DE LA SENSIBILIDAD DE LERCH GROSSMAN

Los conos fueron creados a partir de los valores de entrada anteriores y analizados para el rango de sensibilidades consignadas ($\pm 20\%$) y ($\pm 10\%$). El cono del caso base en todos los casos fue \$1250

- Precio del metal ($\pm 20\%$) simplemente cambiando el precio de venta en las cantidades del cono del caso base, precio del oro ($\pm 20\%$);
- Costos unitarios de minado ($\pm 10\%$);
- Costos unitarios de procesamiento (esto incluye G&A) ($\pm 10\%$);
- Recuperaciones del proceso ($\pm 10\%$)
- Tasa de descuento ($\pm 10\%$)

4.2. ANÁLISIS DE RIESGO

Los resultados que se obtienen al aplicar los criterios de evaluación no miden con exactitud la rentabilidad del proyecto minero, sino solo la de uno de los tantos escenarios futuros posibles. Los cambios que casi con certeza se producirán en esperar que la rentabilidad calculada efectivamente tenga el proyecto implementado.

Los resultados que se obtienen al aplicar los criterios de evaluación no miden con exactitud la rentabilidad del proyecto, sino solo la de uno de los tantos escenarios futuros posibles. Por ello, la decisión sobre la aceptación o el rechazo de un proyecto debe basarse, más que en el VAN positivo o negativo, en comprender el origen de la

rentabilidad de inversión y del impacto de la no ocurrencia de algún parámetro considerado en el cálculo del resultado.

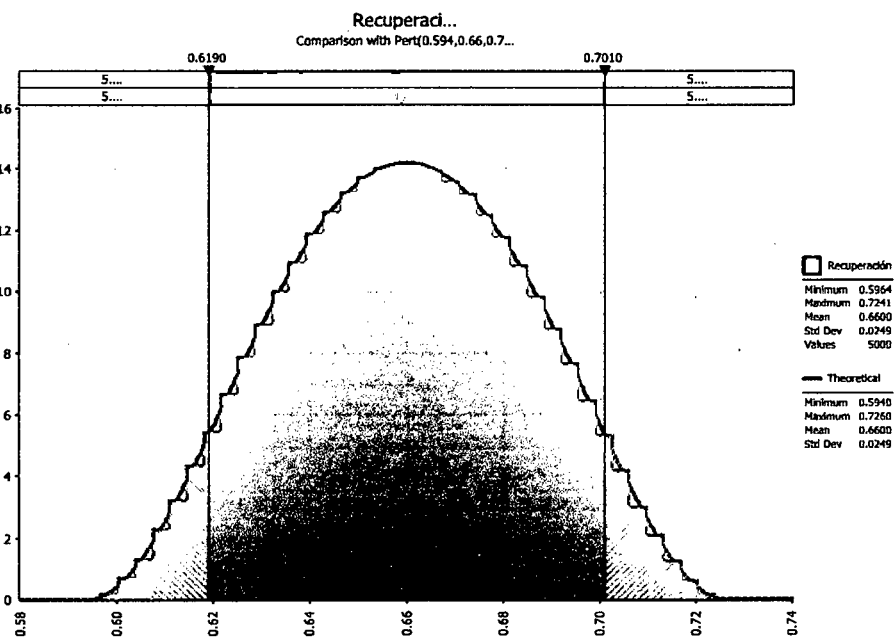
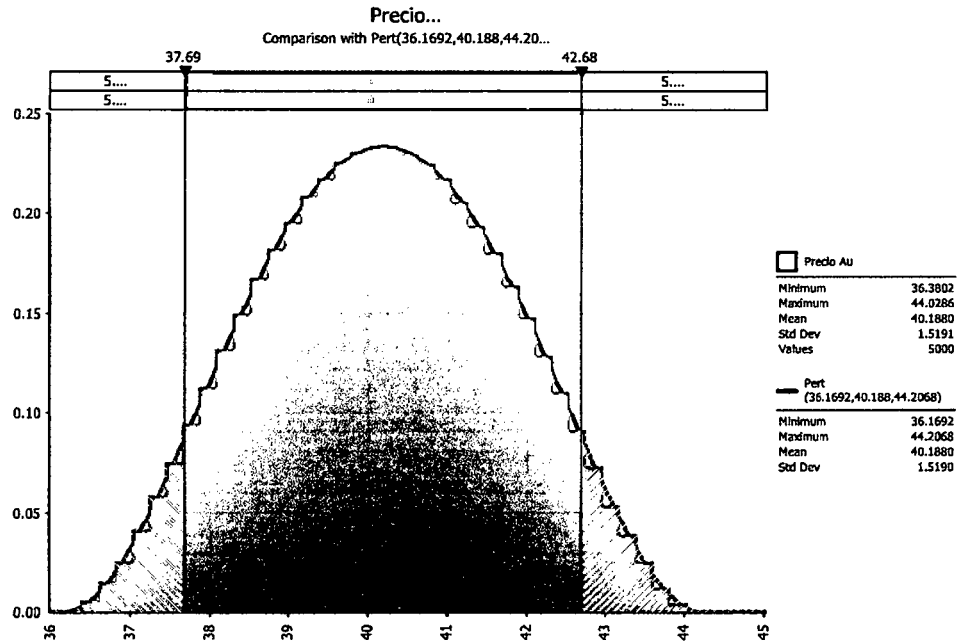
El principal problema de los modelos de riesgo para enfrentar esta situación radica en que básicamente consideran información histórica para suponer, por ejemplo, probabilidades de ocurrencia que podrían asignarse a los flujos de caja proyectada.

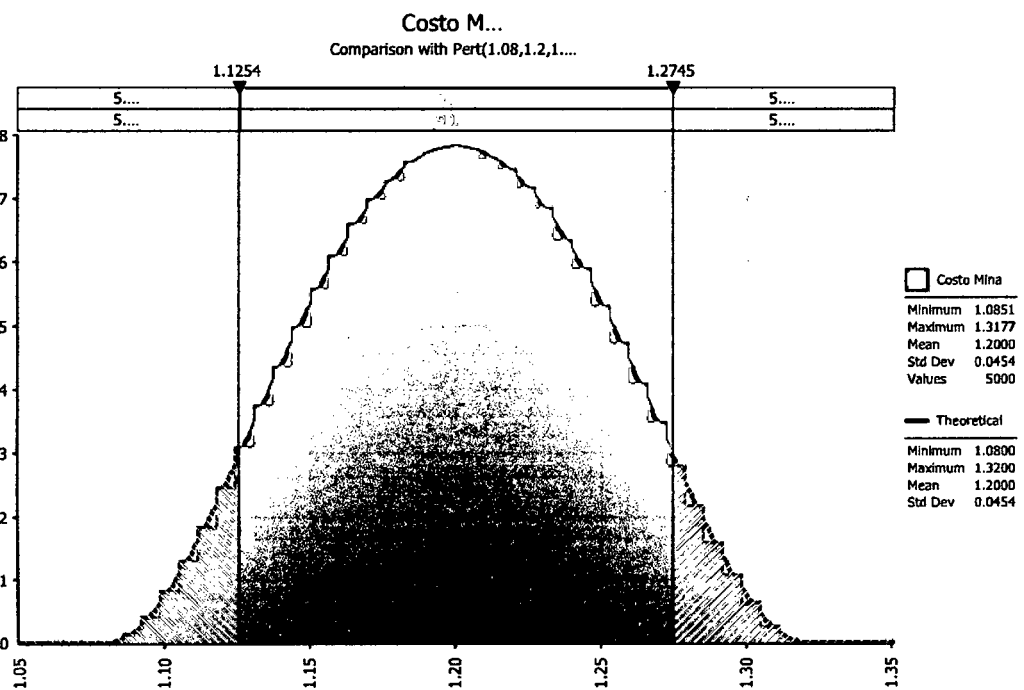
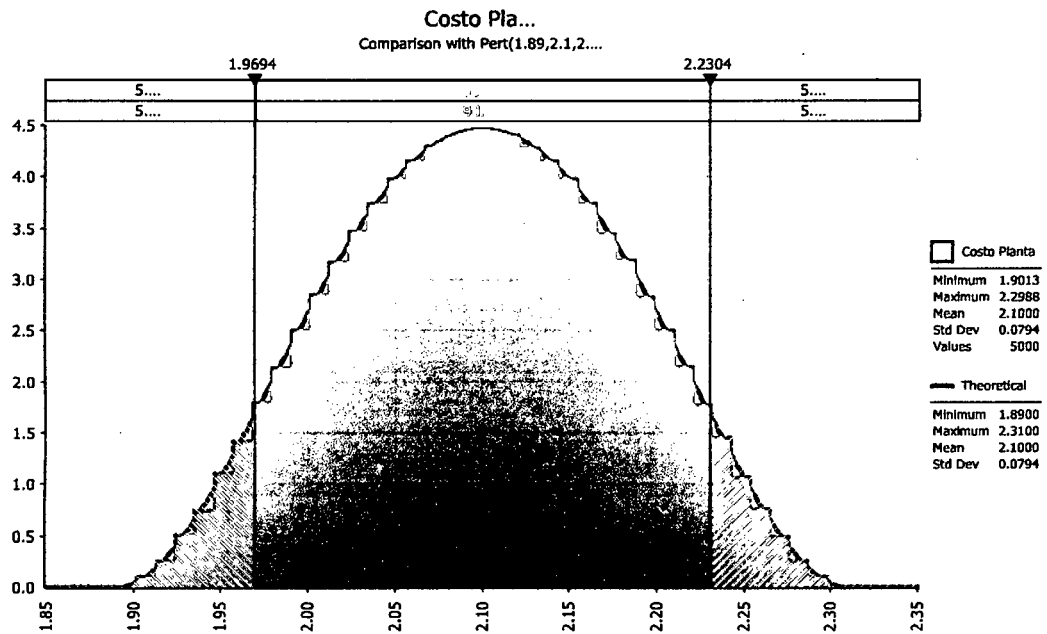
Es práctica habitual realizar los análisis económicos suponiendo que los valores de todas las variables se conocen con certeza, y tomar en consideración el riesgo y la incertidumbre de una forma intuitiva, no cuantificada, confiando en la experiencia, la formación y el criterio del decidir.

Sin embargo, en los proyectos mineros nunca existe la certeza total y son numerosos los factores (ley, precio, tonelaje, recuperación etc.) que aportan una incertidumbre considerable.

El análisis de riesgo es una de las técnicas más aceptadas en la evaluación de proyectos permitiendo cuantificar las probabilidades de éxito y fracaso (riesgo) de un proyecto en base a datos relativamente preliminares, mediante técnicas de simulación.

Para este caso en estudio y recalcando que la aplicación de esta técnica mediante @Risk. Las variables y sus distribuciones fueron asignadas en forma discreta con el fin de otorgar un acercamiento al comportamiento característico que presenta normalmente cada una de ellas. Los resultados son mostrados la figura 47.





Figuras 47 - Distribución de variables

En @Risk, se ha generado todas las combinaciones posibles creando un total de 5000 iteraciones, los cuales son evaluados entregándonos una gama de valores de VPN que al ser ploteados mediante un gráfico de distribución (histograma) permiten

obtener una curva que muestra la probabilidad de éxito de un cierto valor del VPN.

Con el proyecto en fases posteriores (estudios de factibilidad e ingeniería de detalles). Lo anterior implicaría mayores inversiones en estudios y pruebas con el fin de dar mayor grado de certeza a los parámetros involucrados en la evaluación del proyecto.

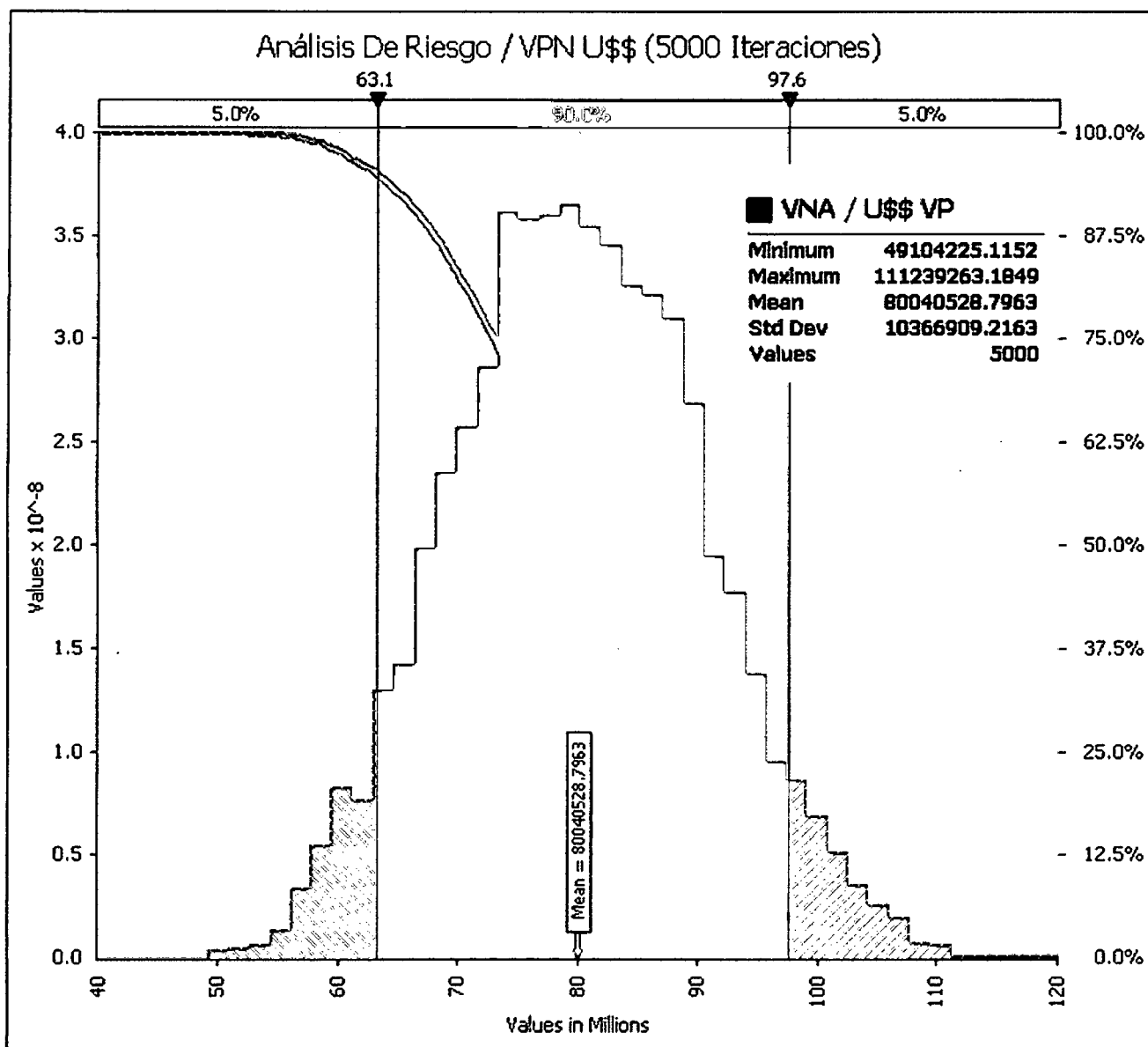


Figura 48: Análisis de riesgo

El grafico nos muestra una probabilidad de 90% de ocurrencia, el valor del VPN a alcanzar se encontrará entre 63,1 U\$\$ M y 97,6 U\$\$M y el valor medio esperado del VPN es 80 U\$\$ M.

Los extremos exteriores (Percentiles) indican que con una probabilidad del 5% el valor del VPN será inferior a 63,1 U\$\$ M, y que con una probabilidad del 5% el resultado será superior a 97,6 U\$\$M.

Para el caso en estudio y con la estrategia de consumo de reservas determinada, se ha obtenido que para un VPN de 80 0405 28,79 US\$ se tiene 44.4% de probabilidad de éxito, lo que podría clasificar al proyecto dentro de un rango aceptable (figura 48) dentro del negocio minero, pero que en definitiva dependerá del grado de aversión al riesgo que tenga el inversionista, permitiendo continuar.

CONCLUSIONES

La variabilidad de la mayoría de los precios de los metales bases hace que la compañía use un promedio razonable para el cálculo de las reservas, las computadoras en estos tiempos permiten hacer muchos escenarios de análisis de sensibilidad y riesgo una herramienta necesaria para poder responder a los riesgos negativos y positivos.

Todos los costos, precios, recuperaciones, tasas de interés, etc. que se consideran en el modelo económico tienen un carácter estimatorio y son por lo tanto factores asumidos.

Se ha encontrado que el pit38 es la envolvente económica adecuada para el tajo Minasampa con un VPN de 79,94M\$ además de acuerdo al objetivo trazado es el que entrega mayor seguridad para cumplir debido a su mayor estabilidad ante el comportamiento de las principales variables como material a mover, costo total, razón estéril-mineral, precio, costo y recuperaciones en relación a los otros pits. Generar el plan de producción con respecto a la secuencia de planificación se obtienen dos fases el pit 16 y el pit 38, aunque no se puede establecer un patrón de comportamiento para ello, debido a que depende principalmente de las políticas de cada empresa y las condiciones técnico-operacionales. Se concluye que para la etapa de planificación y programación del tajo Minasampa el procedimiento utilizado para la obtención del pit final y la obtención de un plan minero ha sido satisfactorio desde el punto de vista teórico y práctico, al poder conjugar ambos factores en forma eficiente

Una de las principales características de este trabajo fue la utilización de la herramienta informática whittle para la determinación del pit final.

Para la obtención del plan minero preliminar a largo plazo se utilizó el algoritmo de Milawa pudiendo ver las grandes ventajas de contar con un plan donde es posible simular en un rango de condiciones de explotación técnicas y operativas. En definitiva esta etapa nos muestra que cuando se explota de las diferentes zonas del pit a lo largo de toda su vida y con el propósito de obtener el máximo de beneficios.

Además, con software @risk se quedó a la vista generar análisis de sensibilidad y riesgo para el caso en estudio, donde las variables que representan mayor riesgo es el precio del oro y recuperación metalúrgica con respecto al VPN, decisiones a tomar en cualquier proyecto, principalmente en esta etapa de planificación es sobre las determinadas variables de control de los riesgos negativos y positivos, decisiones de invertir en estudios que ayuden a disminuir la incertidumbre, se ha obtenido que para un VPN de 80 0405 28,79 US\$ se tiene 44.4% de probabilidad de éxito

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de estructura de capital y el costo de capital de la empresa.
 2. Realizar un estudio de riesgo geológico, considerando que “La incertidumbre es radicalmente distinta al riesgo... Un riesgo es una incertidumbre medible.
 3. Se debe considerar las decisiones de inversión y financiamiento, en el sentido en que activos debe invertir la empresa y como se conseguirán los fondos para las inversiones.
 4. Realizar un estudio de a detalle de las recuperaciones metalúrgicas de acuerdo a dominio litológico.
-

BIBLIOGRAFÍA

- AYMACHOQUE TINCUSI JAVIER (2008) Tesis: La programación dinámica aplicada a la secuencia de minado superficial de un yacimiento de oro mina la virgen de la compañía minera san simon s.a. Universidad nacional de ingeniería – UNI.
 - BUSTAMANTE ESPEJO LILIA DAFNE (2010) Tesis: Evaluación de método de planificación de largo plazo en mina Chuquicamata. Universidad de Chile - Santiago de Chile.
 - BUSTILLO REVUELTA, M. y LOPEZ JIMENO C. (1997): “Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras”. Ed. Entorno Gráfico, Madrid.
 - DIMITRAKOPOULOS ROUSSOS (2007) Orebody modelling and strategic mine planning uncertainty and risk management models. Second edition. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy 2007 Spectrum Series Nro 14.
 - GAGDELEN KADRI: Apuntes del curso de planificación minera estratégica, 19 al 23 de Marzo de 2007, Antofagasta- Chile.
 - GALLARDO GUERRERO, GUSTAVO (2012): Diplomado internacional en planificación minera, Lima tema fundamentos de planificación minera superficial 22 de junio al 11 de agosto.
-

- GALLARDO GUERRERO, GUSTAVO (2012): Open pit avanzado Lima.
 - GONZALES PAIHUA ,TOMÁS (2010) Tesis: Diseño de minas a tajo abierto
Universidad nacional de ingeniería UNI
 - HUSTRULID W. y KUCHTA M. (2006).”Open Pit Mine Planning & Design”
.Ed. Taylor & Francis.
 - IAN C. RUNGE, (1998): Mining Economics and Strategy, Published by the
Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc 1998.
 - KENNETH F. LANE, (1988): The economic definition of ore – Cut Off in theory
and practice, Mining Journal Books Limited, London, 1988.
 - RENDU BY JEAN-MICHEL, (2008): An introduction to Cut-Off grade
estimation, Society for Mining. Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME),
Littleton, Colorado 2008.
 - RUBIO ESQUIVEL, ENRIQUE 2008: Informe de tareas MI75E – tópicos
avanzados: Optimización de programa de producción de mina a rajo abierto
Universidad de Chile - Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas. Depto. Ingeniería
de Minas.
-

- WHITTLE BASICO CURSO 2009: Establecimiento de una estrategia de optimización para el diseño y planificación de rajos mediante el uso de whittle four-x.

ANEXO

Figura 3: Vista isométrica 3D de la superficie topográfica del proyecto Minaspampa

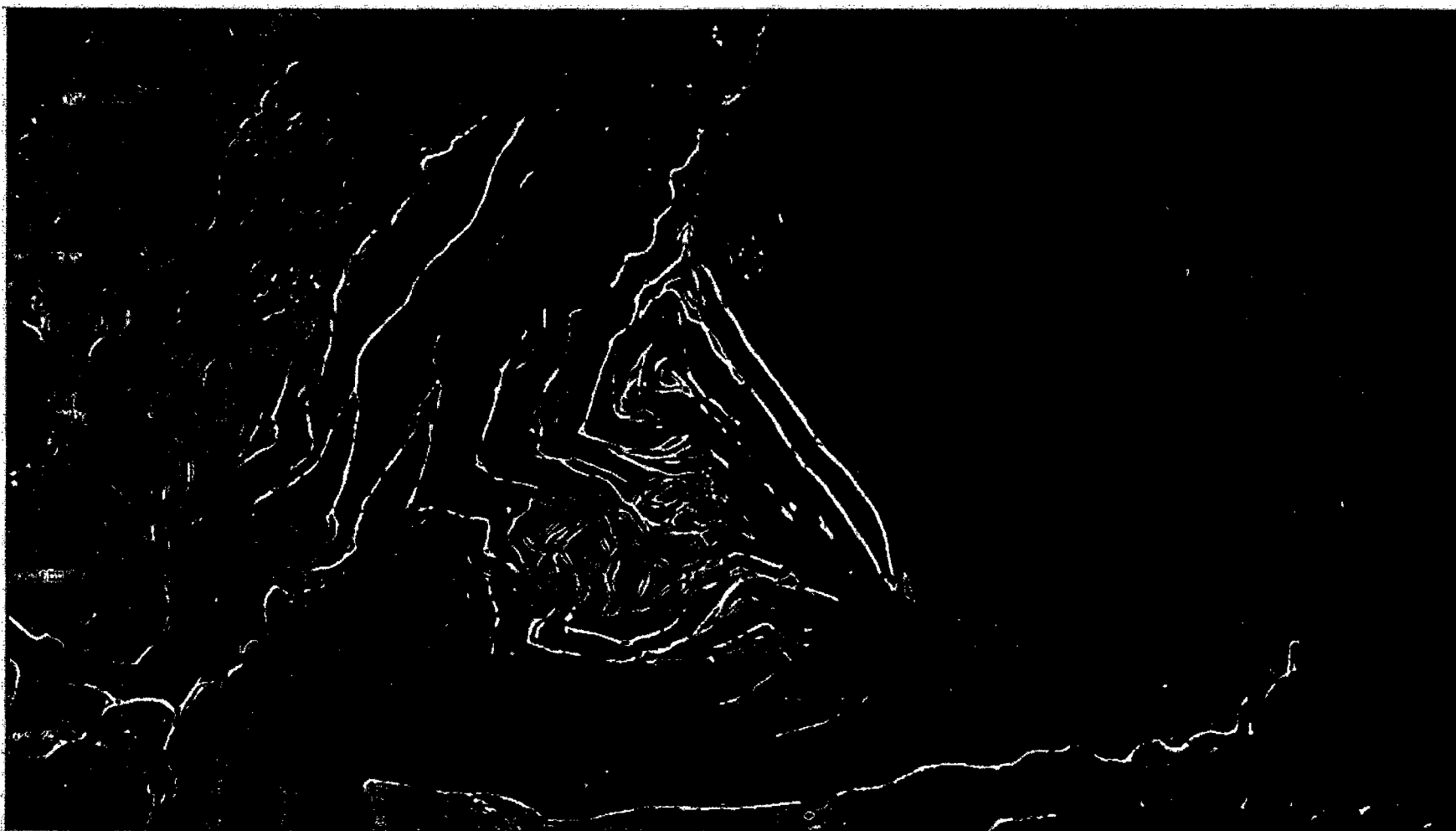


Figura 4: Ubicación de los taladros RCD con sus trazas - proyecto Minas pampa

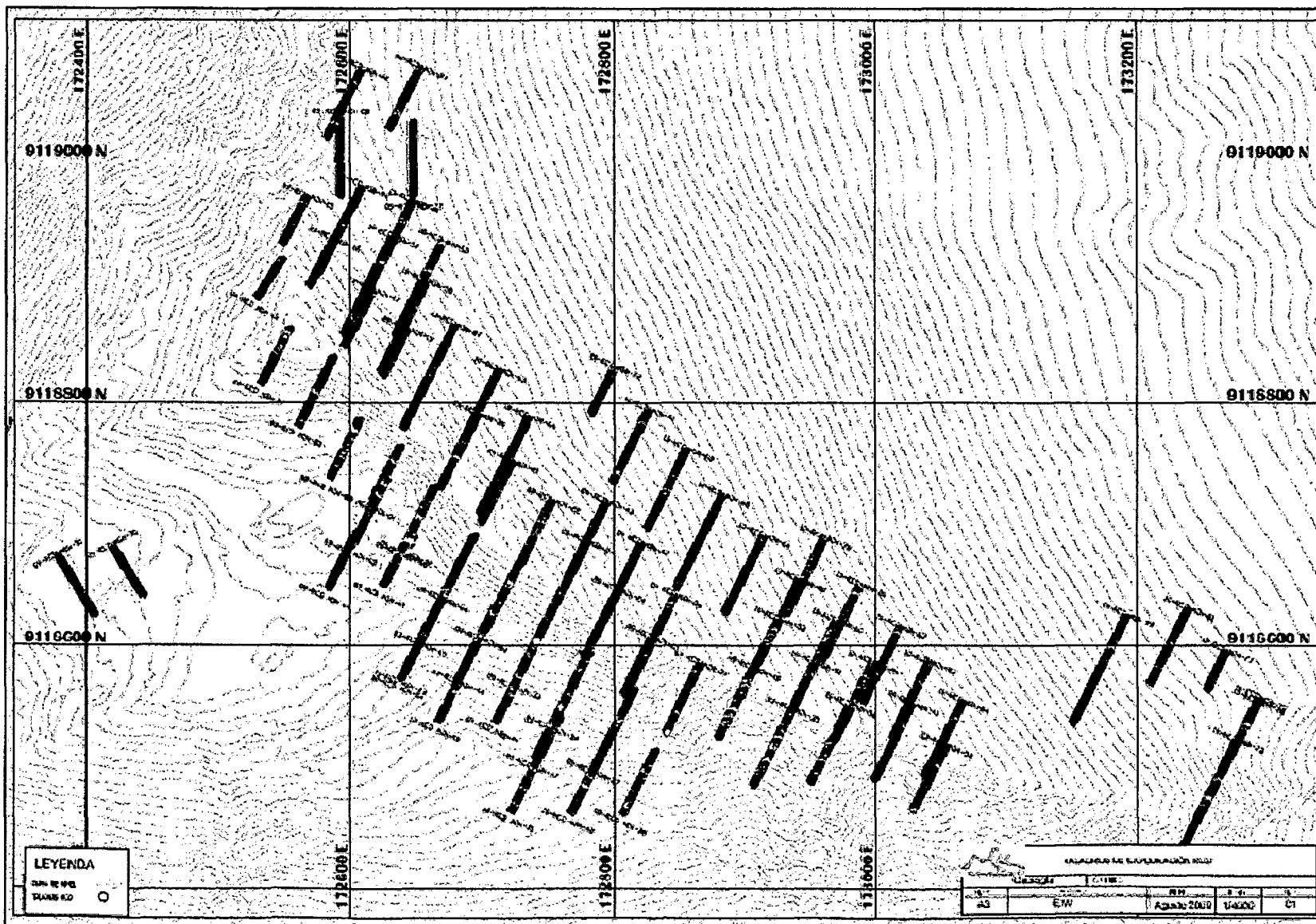
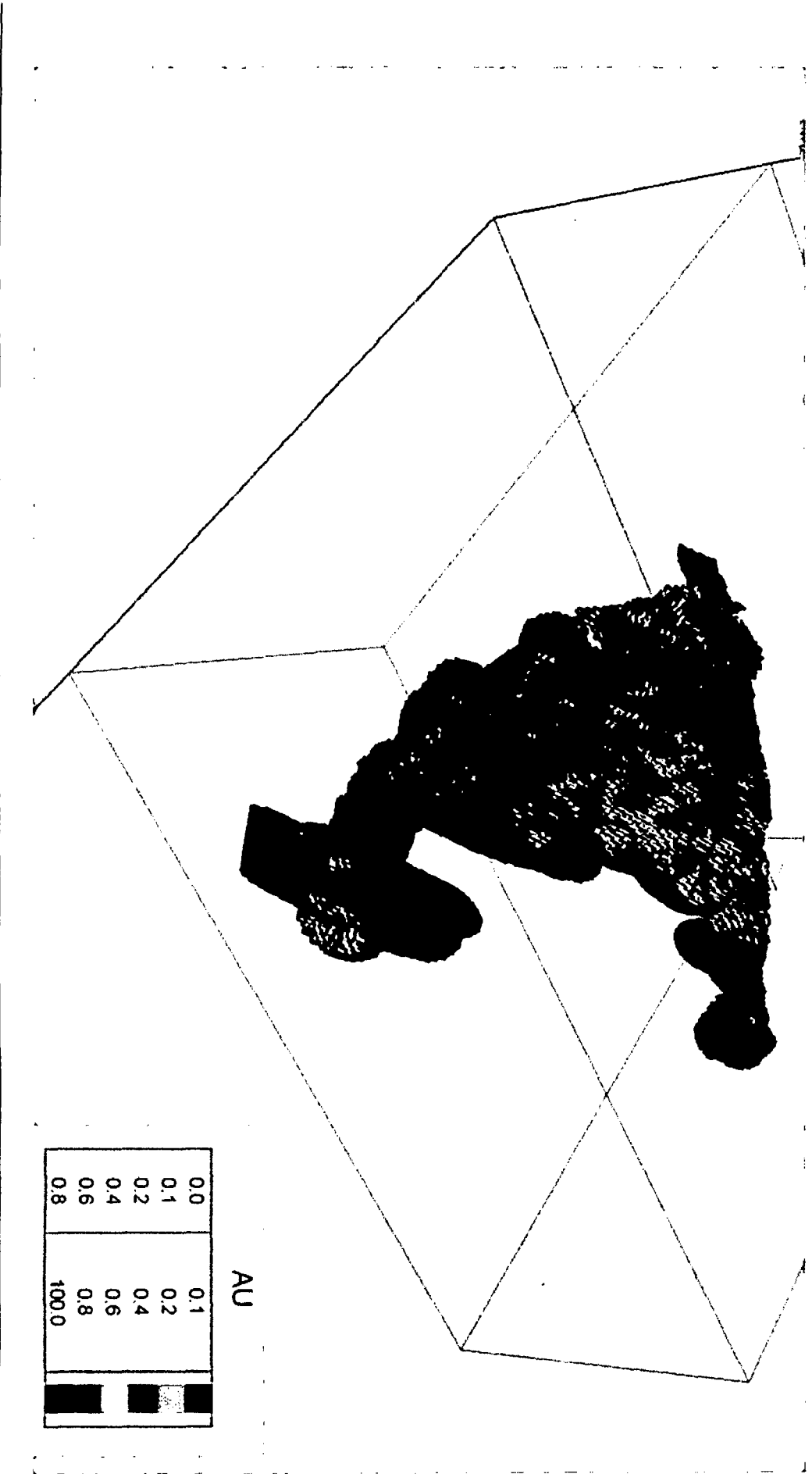


Figura 5: Modelo de bloques con los recursos clasificados - proyecto Minaspampa



Figura 6: Modelo de bloques con las leyes de oro - proyecto Minaspanpa



Factores Mineros Económico-Técnico

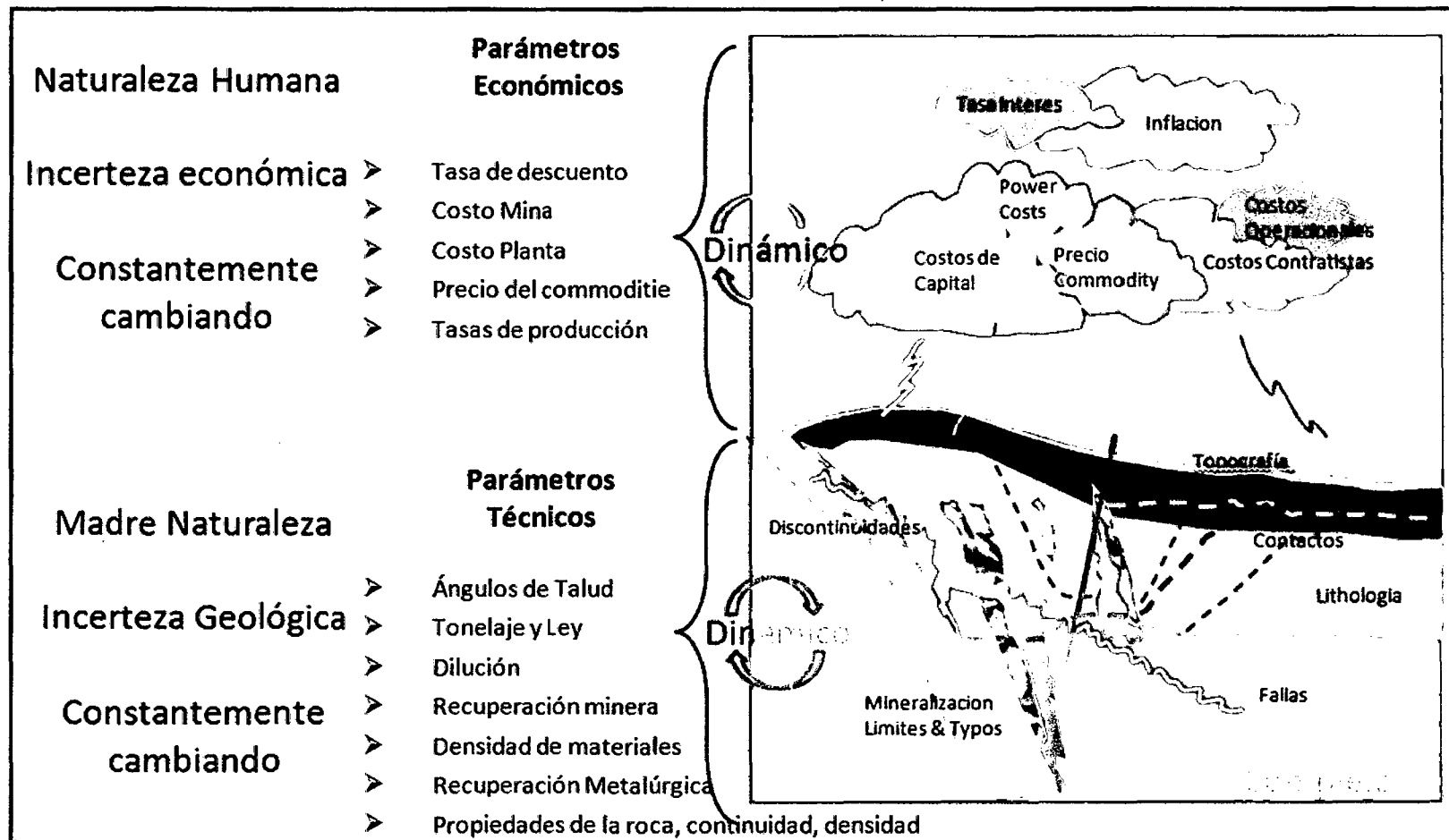


Figura 23: Principales variables en el negocio minero

Tabla 7: Hoja de cálculo del revenue factor

HOJA DE CALCULO DE REVENUE FACTOR - PARA USAR EN WHITLLE								
Unidad	Precio Base	Precio Inicial	Precio Final	N° Pasos	No Pit	Start	Step	End
\$/gr	40,19	19,93	54,66	85	86	0,496	0,012	1,360
Us\$/oz	1250	620	1700					

n°pit	Revenue factor	Precio
1	0,50	620
2	0,51	635
3	0,52	650
4	0,53	665
5	0,54	680
6	0,56	695
7	0,57	710
8	0,58	725
9	0,59	740
10	0,60	755
11	0,62	770
12	0,63	785
13	0,64	800
14	0,65	815
15	0,66	830
16	0,68	845
17	0,69	860
18	0,70	875
19	0,71	890
20	0,72	905
21	0,74	920
22	0,75	935
23	0,76	950
24	0,77	965
25	0,78	980
26	0,80	995
27	0,81	1 010
28	0,82	1 025
29	0,83	1 040
30	0,84	1 055
31	0,86	1 070
32	0,87	1 085
33	0,88	1 100
34	0,89	1 115
35	0,90	1 130

n°pit	Revenue factor	Precio
36	0,92	1 145
37	0,93	1 160
38	0,94	1 175
39	0,95	1 190
40	0,96	1 205
41	0,98	1 220
42	0,99	1 235
43	1,00	1 250
44	1,01	1 265
45	1,02	1 280
46	1,04	1 295
47	1,05	1 310
48	1,06	1 325
49	1,07	1 340
50	1,08	1 355
51	1,10	1 370
52	1,11	1 385
53	1,12	1 400
54	1,13	1 415
55	1,14	1 430
56	1,16	1 445
57	1,17	1 460
58	1,18	1 475
59	1,19	1 490
60	1,20	1 505
61	1,22	1 520
62	1,23	1 535
63	1,24	1 550
64	1,25	1 565
65	1,26	1 580
66	1,28	1 595
67	1,29	1 610
68	1,30	1 625
69	1,31	1 640
70	1,32	1 655

n°pit	Revenue factor	Precio
71	1,34	1 670
72	1,35	1 685
73	1,36	1 700
74	1,37	1 715
75	1,38	1 730
76	1,40	1 745
77	1,41	1 760
78	1,42	1 775
79	1,43	1 790
80	1,44	1 805
81	1,46	1 820
82	1,47	1 835
83	1,48	1 850
84	1,49	1 865
85	1,50	1 880
86	1,52	1 895
87		
88		
89		
90		
91		
92		
93		
94		
95		
96		
97		
98		
99		
100		
101		
102		
103		
104		
105		

Tabla 8: Resultados obtenidos por cada uno de los pit anidados

Pit	Rev Per	Waste Tonnes	Ore Tonnes	AuT Grade	Strip Ratio	Roca Tonnes	Mine life years	Open pit cashflow best \$	Open pit cashflow worst \$
1	0,50	4 329 289	8 094 614	0,73	0,5	12 423 903	2,5	76 043 994	76 043 994
2	0,51	4 360 610	8 285 038	0,72	0,5	12 645 648	2,6	76 424 150	76 344 192
3	0,52	4 438 546	8 531 791	0,71	0,5	12 970 337	2,7	76 921 631	76 725 413
4	0,53	4 818 587	8 904 150	0,69	0,5	13 722 737	2,8	77 891 647	77 339 790
5	0,54	4 890 289	9 157 287	0,68	0,5	14 047 576	2,9	78 317 285	77 609 879
6	0,56	4 946 662	9 476 637	0,67	0,5	14 423 299	2,9	78 793 700	77 873 777
7	0,57	4 962 917	9 685 803	0,66	0,5	14 648 720	3,0	79 053 179	78 015 922
8	0,58	4 997 127	9 931 160	0,65	0,5	14 928 287	3,1	79 460 888	78 280 234
9	0,59	5 030 685	10 196 990	0,64	0,5	15 227 675	3,1	79 913 094	78 564 298
10	0,60	5 100 907	10 533 152	0,62	0,5	15 634 059	3,2	80 474 202	78 850 504
11	0,62	5 182 723	10 821 805	0,61	0,5	16 004 528	3,3	80 935 892	79 091 918
12	0,63	5 367 520	11 336 198	0,59	0,5	16 703 718	3,4	81 747 030	79 579 188
13	0,64	5 466 383	11 674 774	0,58	0,5	17 141 157	3,5	82 223 967	79 832 508
14	0,65	6 217 455	12 488 114	0,56	0,5	18 705 569	3,8	83 544 916	80 624 662
15	0,66	6 312 343	12 830 139	0,55	0,5	19 142 482	3,9	83 934 384	80 765 985
16	0,68	6 454 803	13 184 745	0,54	0,5	19 639 548	4,0	84 328 405	80 807 817
17	0,69	6 553 247	13 532 666	0,54	0,5	20 085 913	4,1	84 697 349	81 016 835
18	0,70	6 751 797	14 046 260	0,52	0,5	20 798 057	4,2	85 255 678	81 245 297
19	0,71	6 852 857	14 331 470	0,52	0,5	21 184 327	4,3	85 516 585	81 299 965
20	0,72	6 988 034	14 694 146	0,51	0,5	21 682 180	4,4	85 850 259	81 388 935
21	0,74	7 024 451	14 984 225	0,50	0,5	22 008 676	4,4	86 063 065	81 466 361
22	0,75	7 212 820	15 395 562	0,50	0,5	22 608 382	4,6	86 395 666	81 517 219
23	0,76	7 625 219	15 902 931	0,49	0,5	23 528 150	4,7	86 806 967	81 557 994
24	0,77	7 677 225	16 241 676	0,48	0,5	23 918 901	4,8	87 001 634	81 566 456
25	0,78	7 734 592	16 504 685	0,47	0,5	24 239 277	4,8	87 138 011	81 564 220
26	0,80	7 859 647	16 932 761	0,47	0,5	24 792 408	5,0	87 357 677	81 582 806
27	0,81	8 125 325	17 415 347	0,46	0,5	25 540 672	5,1	87 621 663	81 641 996
28	0,82	8 294 114	17 711 045	0,45	0,5	26 005 159	5,2	87 771 759	81 623 064
29	0,83	8 318 491	17 982 188	0,45	0,5	26 300 679	5,2	87 871 875	81 493 942
30	0,84	8 712 258	18 932 026	0,44	0,5	27 644 284	5,5	88 277 962	81 248 402
31	0,86	8 748 303	19 247 114	0,43	0,5	27 995 417	5,6	88 371 289	81 122 106
32	0,87	9 041 488	19 671 978	0,43	0,5	28 713 466	5,7	88 518 091	81 030 252
33	0,88	9 059 870	19 961 870	0,42	0,5	29 021 740	5,7	88 580 669	80 965 357
34	0,89	9 053 113	20 221 497	0,42	0,5	29 274 610	5,8	88 627 177	80 897 761
35	0,90	9 173 140	20 530 331	0,42	0,5	29 703 471	5,8	88 685 923	80 840 871
36	0,92	9 762 258	21 547 619	0,40	0,5	31 309 877	6,1	88 893 479	80 655 929
37	0,93	10 019 504	21 974 543	0,40	0,5	31 994 047	6,2	88 964 686	80 424 747
38	0,94	10 900 269	22 623 580	0,39	0,5	33 523 849	6,4	89 075 431	79 949 451
39	0,95	11 211 064	23 064 597	0,39	0,5	34 275 661	6,5	89 119 927	79 797 659
40	0,96	11 235 262	23 303 644	0,39	0,5	34 538 906	6,5	89 132 341	79 707 427

PIT	Rev Pit	Waste Tonnes	Ore Tonnes	AuT Grade	Strip Ratio	Rock Tonnes	Mine life years	Open pit cashflow best \$	Open pit cashflow worst \$
41	0,98	11 530 674	23 710 219	0,38	0,5	35 240 893	6,6	89 149 767	79 481 025
42	0,99	11 601 224	24 019 015	0,38	0,5	35 620 239	6,7	89 154 864	79 333 601
43	1,00	11 747 421	24 373 929	0,38	0,5	36 121 350	6,8	89 153 739	79 166 510
44	1,01	11 923 846	24 734 827	0,37	0,5	36 658 673	6,9	89 144 894	78 970 473
45	1,02	11 971 893	24 984 684	0,37	0,5	36 956 577	6,9	89 135 437	78 857 740
46	1,04	12 115 908	25 360 668	0,37	0,5	37 476 576	7,0	89 111 847	78 637 086
47	1,05	12 165 640	25 644 453	0,36	0,5	37 810 093	7,0	89 093 912	78 531 934
48	1,06	12 322 806	26 130 103	0,36	0,5	38 452 909	7,1	89 050 875	78 346 274
49	1,07	12 534 180	26 510 512	0,36	0,5	39 044 692	7,2	89 010 289	78 147 436
50	1,08	12 823 906	27 011 730	0,35	0,5	39 835 636	7,3	88 948 159	77 857 462
51	1,10	12 938 814	27 411 761	0,35	0,5	40 350 575	7,4	88 897 404	77 653 446
52	1,11	12 869 557	27 677 221	0,35	0,5	40 546 778	7,4	88 870 558	77 521 528
53	1,12	13 187 447	28 351 803	0,34	0,5	41 539 250	7,6	88 754 429	77 135 356
54	1,13	13 269 002	28 681 689	0,34	0,5	41 950 691	7,6	88 703 006	76 952 576
55	1,14	13 336 115	29 027 271	0,34	0,5	42 363 386	7,7	88 645 892	76 761 065
56	1,16	13 694 661	29 599 790	0,33	0,5	43 294 451	7,8	88 521 462	76 394 388
57	1,17	13 740 028	29 930 907	0,33	0,5	43 670 935	7,9	88 464 621	76 190 291
58	1,18	13 845 338	30 431 740	0,33	0,5	44 277 078	8,0	88 363 210	75 896 431
59	1,19	14 729 763	31 965 486	0,32	0,5	46 695 249	8,3	87 958 792	74 849 943
60	1,20	15 135 104	33 141 498	0,31	0,5	48 276 602	8,6	87 677 431	74 133 480
61	1,22	15 238 017	33 547 318	0,31	0,5	48 785 335	8,6	87 592 338	73 901 275
62	1,23	15 376 647	33 979 157	0,31	0,5	49 355 804	8,7	87 492 500	73 634 472
63	1,24	15 713 592	34 587 098	0,30	0,5	50 300 690	8,8	87 326 655	73 229 929
64	1,25	16 079 309	35 400 814	0,30	0,5	51 480 123	9,0	87 113 267	72 681 281
65	1,26	18 679 438	36 701 787	0,29	0,5	55 381 225	9,2	86 502 067	71 464 741
66	1,28	18 801 617	37 192 913	0,29	0,5	55 994 530	9,3	86 371 534	71 153 667
67	1,29	19 692 668	38 648 438	0,28	0,5	58 341 106	9,6	85 892 087	70 156 314
68	1,30	24 454 521	40 764 577	0,28	0,6	65 219 098	10,0	84 860 991	68 325 615
69	1,31	24 791 029	41 456 754	0,28	0,6	66 247 783	10,1	84 660 555	67 933 373
70	1,32	27 695 903	44 249 569	0,27	0,6	71 945 472	10,6	83 654 022	66 179 136
71	1,34	27 821 754	44 963 712	0,26	0,6	72 785 466	10,7	83 486 666	65 776 800
72	1,35	28 173 482	45 752 925	0,26	0,6	73 926 407	10,8	83 275 957	65 320 139
73	1,36	28 148 827	46 304 829	0,26	0,6	74 453 656	10,9	83 166 320	65 064 410
74	1,37	28 039 086	46 711 293	0,26	0,6	74 750 379	10,9	83 103 621	64 905 780
75	1,38	28 405 690	47 486 418	0,26	0,6	75 892 108	11,1	82 880 927	64 490 141
76	1,40	28 318 372	48 138 584	0,25	0,6	76 456 956	11,1	82 732 986	64 250 555
77	1,41	31 429 348	50 232 521	0,25	0,6	81 661 869	11,5	81 812 260	61 155 294
78	1,42	31 609 639	50 866 162	0,25	0,6	82 475 801	11,6	81 648 441	60 781 420
79	1,43	32 101 327	51 575 627	0,24	0,6	83 676 954	11,7	81 427 284	60 284 724
80	1,44	34 313 734	54 094 450	0,24	0,6	88 408 184	12,2	80 516 761	58 391 052
81	1,46	34 453 928	54 763 285	0,24	0,6	89 217 213	12,3	80 344 104	58 063 128
82	1,47	35 327 846	56 235 938	0,23	0,6	91 563 784	12,5	79 863 280	57 086 191
83	1,48	35 297 309	56 685 873	0,23	0,6	91 983 182	12,5	79 776 930	56 877 786
84	1,49	35 552 497	57 523 128	0,23	0,6	93 075 625	12,6	79 551 439	56 334 874
85	1,50	35 460 654	58 100 618	0,23	0,6	93 561 272	12,7	79 436 623	56 090 836
86	1,52	36 333 881	59 522 045	0,23	0,6	95 855 926	12,9	78 988 584	54 979 740

Tabla 12: Variación NPV/Costo procesamiento

PIT	Base 2,10	Baja en 5% 1,99		Aumenta en 5% 2,20		Aumento en 10% 2,31	
	VPN\$	VPN\$	Δ%	VPN\$	Δ%	VPN	Δ%
27	81 641 996	82 636 286	1,20 %	80399736	-1,55 %	79350686	-2,89 %
28	81 623 064	82 419 615	0,97 %	80394520	-1,53 %	79330496	-2,89 %
29	81 493 942	82 293 593	0,97 %	80362707	-1,41 %	79333916	-2,72 %
30	81 248 402	82 246 068	1,21 %	80372248	-1,09 %	79294738	-2,46 %
31	81 122 106	82 159 719	1,26 %	80243199	-1,10 %	79174335	-2,46 %
32	81 030 252	82 106 616	1,31 %	79982658	-1,31 %	79152497	-2,37 %
33	80 965 357	82 045 391	1,32 %	79799736	-1,46 %	78969179	-2,53 %
34	80 897 761	81 907 813	1,23 %	79715877	-1,48 %	78733852	-2,75 %
35	80 840 871	81 747 618	1,11 %	79643965	-1,50 %	78619443	-2,83 %
36	80 655 929	81 549 883	1,10 %	79557325	-1,38 %	78493758	-2,75 %
37	80 424 747	81 136 100	0,88 %	79478565	-1,19 %	78418759	-2,56 %
38	79 949 451	81 011 216	1,31 %	79218227	-0,92 %	78329105	-2,07 %
39	79 797 659	80 889 617	1,35 %	78628750	-1,49 %	77975636	-2,34 %
40	79 707 427	80 620 534	1,13 %	78504112	-1,53 %	77792756	-2,46 %
41	79 481 025	80 464 995	1,22 %	78354573	-1,44 %	77356295	-2,75 %
42	79 333 601	80 303 453	1,21 %	78218625	-1,43 %	77154810	-2,82 %

Tabla 13: NPV/Recuperación

PIT	Base 66%	Rec. 60%		Rec 70%	
	VPN\$	VPN\$	Δ%	VPN\$	Δ%
27	81 641 996	67 528 841	-20,90 %	90 837 717	10,1 %
28	81 623 064	67 500 212	-20,92 %	90 789 398	10,1 %
29	81 493 942	67 438 273	-20,84 %	90 749 046	10,2 %
30	81 248 402	67 405 997	-20,54 %	90 693 059	10,4 %
31	81 122 106	67 346 609	-20,45 %	90 666 765	10,5 %
32	81 030 252	67 317 797	-20,37 %	90 523 435	10,5 %
33	80 965 357	67 259 168	-20,38 %	90 323 421	10,4 %
34	80 897 761	67 131 763	-20,51 %	89 925 686	10,0 %
35	80 840 871	67 100 426	-20,48 %	89 804 548	10,0 %
36	80 655 929	66 906 755	-20,55 %	89 720 701	10,1 %
37	80 424 747	66 632 826	-20,70 %	89 498 067	10,1 %
38	79 949 451	66 475 387	-20,27 %	89 318 415	10,5 %
39	79 797 659	66 316 164	-20,33 %	89 182 554	10,5 %
40	79 707 427	66 235 198	-20,34 %	89 052 509	10,5 %
41	79 481 025	66 146 420	-20,16 %	88 918 533	10,6 %
42	79 333 601	66 030 037	-20,15 %	88 815 329	10,7 %