



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA
PLANIFICACIÓN DE LA EXTRACCIÓN MINERA DE CORTO PLAZO EN UNA
EMPRESA DE LA MEDIANA MINERÍA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

FRANCISCO JOSÉ VARGAS PINCHEIRA

**PROFESOR GUÍA:
SR. JOSÉ ARTURO MOSQUERA CÁDIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SR. PATRICIO MARIO CONCA KEHL
SR. ROBERTO MARIO COMINETTI COTTI-COMETTI**

**SANTIAGO DE CHILE
ENERO, 2011**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA
PLANIFICACIÓN DE LA EXTRACCIÓN MINERA DE CORTO PLAZO EN UNA
EMPRESA DE LA MEDIANA MINERÍA**

En la industria minera, la planificación de las actividades a desarrollar para la extracción del mineral es fundamental para justificar las decisiones de inversión y las metas de producción.

Esta memoria se desarrolló en Haldeman Mining Company S.A., empresa minera ubicada al interior de la quebrada de Sagasca en la región de Tarapacá, y enfrenta solucionar el problema de planificación de extracción de mineral decidiendo el secuenciamiento de extracción de maquinaria. En el yacimiento se utiliza maquinaria no convencional (conocida como roadheader) empleada para la excavación en minería subterránea. Los principales inconvenientes operacionales para la utilización de dicho equipo son las dificultades para maniobrarlo al interior de los túneles de producción debido a sus dimensiones (actividades de perfilamiento), así como los tiempos que requiere el equipo para moverse desde un frente de extracción a otro debido a la baja velocidad de traslado.

Para enfrentar este problema, se formula un modelo de programación matemática que decide el punto de extracción a excavar en cada etapa de la secuencia de explotación, minimizando los traslados del equipo desde una perspectiva global.

El modelo se desarrolla usando la herramienta GAMS y es resuelto empleando el solver IBM ILOG CPLEX, obteniéndose una secuencia extractiva óptima. Dicha secuencia es almacenada en una planilla de cálculo la cual es posteriormente procesada por un programa en Visual Basic que genera una representación gráfica de la secuencia.

Los resultados del modelo son favorables demorando no más de 20 minutos en entregar la solución del problema, tiempo considerablemente inferior al que actualmente requiere el equipo de profesionales encargado de dicha tarea y que corresponde a un poco más de medio día de trabajo.

Más importante, se obtienen reducciones de las distancias de traslado a ser recorridas por la maquinaria. Comparando los resultados con la metodología actual de planificación, la reducción de la distancia de traslado es cercana al 9%. Ello se traduce en mayores rendimientos de la extracción de mineral al emplearse menos tiempo en el traslado, aumentando la producción de toneladas por día en un 3,3% y proyectándose un incremento de US\$ 383 M en las utilidades anuales para el módulo de estudio, lo que corresponde a un 3,2% de la utilidad.

AGRADECIMIENTOS

Esta memoria constituye un logro dentro de mi vida, marcando la finalización de una etapa importante de formación profesional e intelectual.

Quiero agradecer todas las instancias vividas a lo largo de la carrera y de la vida, tanto las favorables como las desfavorables. En particular, agradezco todos los fracasos que pude presenciar y vivir, ya que de ellos obtuve valiosos aprendizajes y ayudaron a formar a la persona que hoy entrega el presente trabajo. Siempre levantarse y luchar ante todo.

Doy las gracias a todos quienes formaron parte de este proceso, en particular a mi familia que estuvo siempre presente, directa o indirectamente. A mi padre por aguantar y apoyar, a mi madre por estimular en su forma y a mis hermanas por estar presentes y ser partes de esta alegría.

A las amistades desarrolladas a lo largo de la carrera, sin ellos no habría sido posible seguir adelante y el proceso no habría sido el mismo. Particularmente, agradecer por aquel grupo que se formó post viaje a Mendoza en el presente año.

Gracias a José, mi profesor guía, por los consejos clave entregados y por aportar siempre un grano de arena con la forma que tiene de ver las cosas. También a Patricio, mi profesor co-guía, quien estuvo disponible para las consultas necesarias y dio en un punto clave cuando me encontraba estancado.

A los gestores de esta memoria. Agradecer Javier por proponer la realización de la memoria y por realizar el contacto necesario. A Rigoberto por la posibilidad brindada para desarrollar esta memoria en Haldeman Mining Company S.A. y por el apoyo brindado durante el transcurso de ella para resolver problemas derivados del modelamiento. Finalmente a la empresa y todos quienes prestaron soporte para el desarrollo de la memoria, particularmente a la gente de la Superintendencia de Ingeniería y Planificación, con sus áreas de planificación y topografía por la información, soporte y los consejos prestados.

	<u>Página</u>
RESUMEN DE LA MEMORIA	ii
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES GENERALES	2
2.1. Investigación operativa y minería subterránea	2
2.2. La empresa	2
2.3. Yacimiento Longacho y roadheaders	5
3. MARCO CONCEPTUAL	6
3.1. Conceptos de la industria minera	6
3.2. Conceptos de la metodología de resolución	9
4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	10
4.1. Justificación	11
4.2. Enfoque de la solución	12
4.3. Objetivos y alcance	13
4.3.1. Objetivo general	13
4.3.2. Objetivos específicos	13
4.3.3. Alcance	13
5. METODOLOGÍA GENERAL	14
5.1. Plan de trabajo	15
5.2. Resultados esperados	16
6. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	17
6.1. Planificación minera	17
6.2. Principales procesos de operación dentro de la mina subterránea	17
6.2.1. Extracción	18
6.2.2. Fortificación	18
6.2.3. Relleno	19
6.3. Restricciones de la operación	20
6.4. Marco teórico y metodológico	22
6.4.1. Marco teórico	22
6.4.2. Marco metodológico	25

6.5. Resultados esperados	33
7. FORMULACIÓN DEL MODELO	33
7.1. Planteamiento del problema y supuestos.....	33
7.2. Modelo de programación matemática	35
7.3. Resolución computacional	41
7.4. Lectura de datos	42
7.5. Resultados obtenidos.....	44
8. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA.....	58
A. Trabajos citados.....	58
B. Referencias bibliográficas	58
ANEXOS.....	60
A. Depósitos tipo pórfido	A1
B. Depósitos exóticos.....	B1
C. Minería subterránea: métodos de extracción y clasificación.....	C1
D. Room and Pillar (Room & Pillar)	D1
E. Proceso productivo en mina subterránea Longacho	E1
F. Modelo desarrollado en GAMS	F1
G. Características de los equipos productivos.....	G1
➤ Roadheader	G1
➤ Jumbo empernador mecanizado.....	G1
➤ LHD a control remoto	G2
H. Infraestructura minera de Longacho.....	H1
➤ Acceso principal.....	H1
➤ Chimeneas de ventilación y evacuación	H1
➤ Comunicaciones	H2
I. Yacimiento Longacho.....	I1
J. Especies minerales.....	J1
K. Procesos posteriores a la extracción de mineral.....	K1
➤ Chancado	K1
➤ Aglomeración y Curado.....	K1
➤ Apilamiento	K1
➤ Lixiviación	K2

➤ Extracción por Solventes (SX)	K2
➤ Electro-Obtención (EW)	K3

LISTA DE TABLAS

	<u>Página</u>
Tabla 1: Directorio de HMC.....	4
Tabla 2: Comparativa entre resultados previos y metodología actual.....	47
Tabla 3: Comparativa de productividad en términos de toneladas por día y hora.....	49
Tabla 4: Comparativa de productividad en términos de toneladas por día y hora 2.....	50
Tabla 5: Comparativa de productividad en términos de toneladas por día y hora 3.....	51
Tabla 6: Incremento de utilidad en el periodo de extracción.....	53
Tabla 7: Comparación de productividades para distintas discretizaciones.	55
Tabla 8: Principales especies minerales de cobre.....	J1

LISTA DE FIGURAS

	<u>Página</u>
Figura 1: Ubicación faena Sagasca HMC.....	3
Figura 2: Estructura administrativa HMC	4
Figura 3: Estructura gerencia de Mina.....	5
Figura 4: Carta Gantt memoria.....	16
Figura 5: Diagrama del proceso productivo.....	18
Figura 6: Plano en planta del diseño de proyecto para unidad extractiva.....	22
Figura 7: Simbología layout bajo método room and pillar.	23
Figura 8: Secuencia de apertura de cruzados.	24
Figura 9: Discretización gráfica de unidad 15E.	25
Figura 10: Layout interno de extracción 15E.	26
Figura 11: Layout de extracción interno y accesos 15E.	26
Figura 12: Representación nodos de discretización 15E.....	27
Figura 13: Layout 15E nodos intersecciones.....	29
Figura 14: Layout 15E tramos entre nodos intersecciones.....	29
Figura 15: Layout 15E numeración nodos intersección.....	30
Figura 16: Módulo de análisis en unidad 15E.....	31
Figura 17: Discretización del módulo de análisis.....	31

Figura 18: Discretización más fina del módulo de análisis.	32
Figura 19: Esquema de distancia operacional.....	35
Figura 20: Esquema de output de modelo panel 7x7.....	42
Figura 21: Esquema de generador de planes 7x7.....	43
Figura 22: Layout unidad 15E bajo extracción modular de sub-paneles.....	44
Figura 23: Esquema numeración de bloques sub-panel 7x7.....	44
Figura 24: secuencias obtenidas utilizando distancia euclidiana.	45
Figura 25: Resultados de programación iterativa del modelo.....	46
Figura 26: Contraste secuencias modelo y metodología actual.....	48
Figura 27: Contraste de secuencias para módulos con distintas formas.	48
Figura 28: Resultado entregado por el modelo para sub-panel de 10x10.	54
Figura 29: Formación por proceso supergéno de un pórfido cuprífero.	A1
Figura 30: Conformación espacial de un pórfido curífero.	A2
Figura 31: Modelo de formación de un depósito Exótico.....	B1
Figura 32: Yacimiento exótico y su yacimiento origen en Codelco Norte.....	B2
Figura 33: Clasificación de métodos de extracción de yacimientos.....	C1
Figura 34: Room and pillar mediante perforación y tronadura.	D2
Figura 35: Proceso productivo en mina subterránea.	E1
Figura 36: Equipo roadheader.....	G1
Figura 37: Jumbo empernador mecanizado.	G2
Figura 38: Equipo LHD (Load – Haul – Dumper).....	G2
Figura 39: Acceso principal.....	H1
Figura 40: Chimenea escalerada.	H2
Figura 41: Comunicaciones por cable radiante.	H2
Figura 42: Vista isométrica de extracción desarrollada en Longacho.	I1
Figura 43: Vista lateral de extracción desarrollada en Longacho.	I1
Figura 44: Vista en planta de extracción desarrollada en Longacho.....	I2
Figura 45: Vista isométrica de proyecto Longacho norte y desarrollos.....	I3
Figura 46: Vista en planta de proyecto Longacho norte y desarrollos.	I4
Figura 47: Chancado.....	K1
Figura 48: Aglomeración y curado.....	K1
Figura 49: Apilamiento.	K2
Figura 50: Lixiviación.	K2

Figura 51: Extracción por solventes.	K3
Figura 52: Electro-obtención.	K3

1. INTRODUCCIÓN

La minería es uno de los componentes principales del crecimiento económico del país. Las condiciones privilegiadas del territorio nacional en cuanto a la existencia de yacimientos de cobre, teniendo el país más de un tercio de las reservas mundiales del metal, han posibilitado que diversas empresas se formen en torno a la extracción del mismo.

Un dato a tener en mente es que durante el año 2009 las exportaciones de cobre sumaron un total de US\$26.906 millones, un 17,98% menos que el año 2008 pero con claras señales de recuperación de la demanda comparando los meses de diciembre de 2008 y 2009, apreciándose un alza de 159,23% según (1). Evidencia de lo anterior se refleja en los datos entregados por el banco central durante el mes de noviembre de 2010, que según (2) indican un aumento de 6,8% comparando los meses de octubre de 2009 y 2010, señalando además que en el periodo acumulado de enero-octubre se refleja un valor total de las exportaciones de US\$30.030,3 millones para el 2010 y US\$21.313,1 millones para el 2009, lo que se traduce en un incremento de un 40,9% dentro del periodo y al menos un aumento de 11,6% con respecto al total del año 2009.

Considerando que el país es el principal exportador del metal rojo y la creciente demanda del mismo para diversos procesos productivos, hacen interesante el desarrollo de la memoria dentro de esta industria

La gran minería del país ha desarrollado esfuerzos en la línea de la profesionalización, optimizando sus procesos y metodologías de extracción, seleccionando la maquinaria adecuada para cumplir con sus compromisos comerciales, legales y de seguridad, dadas las características de cada yacimiento. En contraposición, la pequeña y la mediana minería se encuentran en deuda con respecto a la optimización de procesos y a la profesionalización de la actividad.

Esto último se ha visto ejemplificado con el derrumbe acontecido en la mina subterránea San José, perteneciente a la compañía minera San Esteban, que el 5 de agosto de 2010 dejó atrapados a 33 mineros a 700 metros de profundidad por 70 días. La evidencia señala que la actividad minera se desarrollaba sin contemplar aspectos esenciales de seguridad para los trabajadores y que la suerte evitó una tragedia. La profesionalización de la actividad busca cumplir con aspectos básicos de seguridad, diseño y procedimientos en pos de mejores resultados operativos y comerciales.

Dentro de este mercado opera Haldeman Mining Company S.A (HMC), compañía que realiza operaciones de extracción de cobre en la región de Tarapacá y que califica dentro de lo que es la mediana minería nacional.

Esta memoria se enmarca en un esfuerzo que busca ver alternativas de ejecución a los procesos de planificación para la explotación minera del yacimiento subterráneo Longacho, propiedad la citada compañía minera, con objeto de asistir al personal encargado de la planificación en lo que concierne a la programación de secuencias extractivas en el corto plazo para el proyecto Longacho Norte.

Las páginas siguientes describen el proceso desarrollado en pos de generar una herramienta de apoyo a las decisiones de asignación de maquinaria para las faenas de extracción del yacimiento, en un horizonte de planificación de corto plazo.

En ellas se podrá apreciar la ventaja de poseer un modelo que optimice, minimizando globalmente, la distancia recorrida por los equipos entre puntos de extracción.

Una comparativa desde el punto de vista del tiempo empleado en realizar la planificación arroja resultados objetivos de un ahorro en tiempo de análisis al utilizar la herramienta. Contrastando los resultados obtenidos utilizando el modelo con los resultados de la metodología actualmente empleada por la empresa, se aprecia además que se reducen los metros de traslado de los equipos en la extracción de una unidad extractiva del yacimiento, con el consecuente aumento de la productividad medida en toneladas de material excavado por día.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Investigación operativa y minería subterránea

La industria minera, en particular la gran minería, ha incorporado durante los últimos años como parte del negocio a la investigación operativa por medio de la implementación de modelos matemáticos que evalúan la extracción de los yacimientos desde distintas perspectivas.

Para el caso de las minas a cielo abierto (tajo abierto, rajo u open pit) dichos modelos han sido largamente desarrollados, existiendo una alta estandarización en el diseño de extracción por medio de bancos de explotación insertos en un cono invertido. Para dicho sistema extractivo se han desarrollado metodologías que se encuentran establecidas en el contexto minero por los resultados que prestan a la planificación de la explotación. Ejemplos de lo anterior son el método de los conos flotantes, el algoritmo de Lerchs y Grossman (3) y la parametrización de Whittle, empleados para el diseño del rajo desde una perspectiva de factibilidad económica.

En contraposición a lo que ocurre con los rajos, las minas subterráneas carecen de dicha estandarización para explotar los distintos yacimientos existentes. Lo anterior obedece a las características disímiles de la explotación bajo tierra dado el método de extracción empleado y la complejidad de los procesos, principalmente en lo que se refiere a establecer el secuenciamiento de la extracción dentro de cada unidad extractiva.

Esta memoria se genera en la intención de desarrollar un modelo que englobe las variables productivas, lineamientos de diseño y limitantes derivadas de la faena de explotación. Particularmente, se busca confeccionar un modelo que se enfoque en minimizar los traslados de los equipos principales empleados para la extracción minera, entregando una secuencia de excavación.

2.2. La empresa

HMC tiene sus operaciones mineras en la faena Sagasca (Región de Tarapacá, Chile), a unos 120 kilómetros al este de la ciudad de Iquique, en el lugar que da nombre a la faena y que se conoce como la quebrada de Sagasca.



Figura 1: Ubicación faena Sagasca HMC.

Sagasca SX-EW fue el proyecto minero que llevó adelante HMC, en base a los activos que adquirió a Minera e Inmobiliaria Cascada S.A., durante la segunda mitad del año 2002. El paquete de activos adquiridos incluyó además las instalaciones de lixiviación en pilas y la planta de extracción por solventes y electro obtención de la planta Lo Aguirre de Minera Pudahuel, la matriz de Inmobiliaria Cascada. Dicha planta fue trasladada e instalada en la ubicación actual de la empresa.

El proyecto consideró una inversión de US\$ 24 millones para dar inicio a las actividades de mina a cielo abierto y subterránea, junto con las actividades de planta para producir 19.000 toneladas anuales de cátodos de cobre, incorporando tecnología de punta en minería subterránea, lixiviación, extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW).

La empresa opera, además, una planta de quema de azufre con capacidad para producir 120.000 toneladas anuales de ácido sulfúrico.

Desde su puesta en marcha en el mes de septiembre del 2004, los cátodos de cobre producidos por la compañía se han destacado por su alto nivel de calidad y pureza, superando los requerimientos de cobre grado A de la Bolsa de Metales de Londres y abasteciendo a las plantas más exigentes de fundición continua de Europa, cuyos productos se utilizan mayoritariamente en los sectores de electricidad y electrónica.

Inicialmente la explotación se basó en reservas de 9 millones de toneladas de óxidos con una ley promedio de 1,57% de cobre total. Paralelamente, la operación procesó otros 24 millones de toneladas de rípios con una ley de 0,48% de cobre, que fueron generados anteriormente de la extracción del yacimiento subterráneo Cascada (desechos del proceso antiguo de obtención por medio de cemento de cobre, con recuperación menor que la lixiviación).

En la actualidad la empresa cuenta con el yacimiento subterráneo Logacho, rípios de la operación anterior de cascada y otros rajos, y algunas nuevas exploraciones que en conjunto totalizan más de 29 millones de toneladas de reservas. La extracción

de mineral se proyecta en un horizonte de al menos 10 años y se realiza tanto de bancos de extracción (rajos) con una ley entre el 0,7% y el 1% y principalmente el yacimiento conocido como Longacho, el cual es descrito en el capítulo 0.

La compañía minera posee oficinas comerciales y administrativas en las ciudades de Santiago e Iquique, junto con las oficinas que se encuentran al interior de la faena. En ella trabajan cerca de 400 personas contratadas directamente por la empresa, con funciones administrativas y de producción. A dicha cifra se debe adicionar los trabajadores ligados a empresas contratistas que prestan servicios de distinta índole.

HMC califica dentro de lo que es la mediana minería nacional por su nivel de producción de cobre de 19.000 toneladas anuales de cátodos de cobre y tiene ventas por US\$ 150 millones anuales.

En la actualidad, HMC pertenece a la familia Solari (dueños de Falabella) y su presencia es apreciable en los miembros del directorio que dirigen a la compañía.

Tabla 1: Directorio de HMC

Presidente	
Sergio Cardone Solari	
Directores	
Piero Solari Donaggio	Matías Cardone Armendáriz
Carlo Solari Donaggio	Enrique Ayala Marfil
Nicolás Bañados Lyon	Antonio Ortúzar Solar
Gonzalo Serrano Gutiérrez	Patricio Muñoz Molina
Carlos Souper Urra	Fernando Fuentes Moccia

Administrativamente, HMC está conformada por un directorio que evalúa la gestión del gerente general y las distintas gerencias subordinadas. La estructura organizativa es la que se aprecia en la siguiente figura:

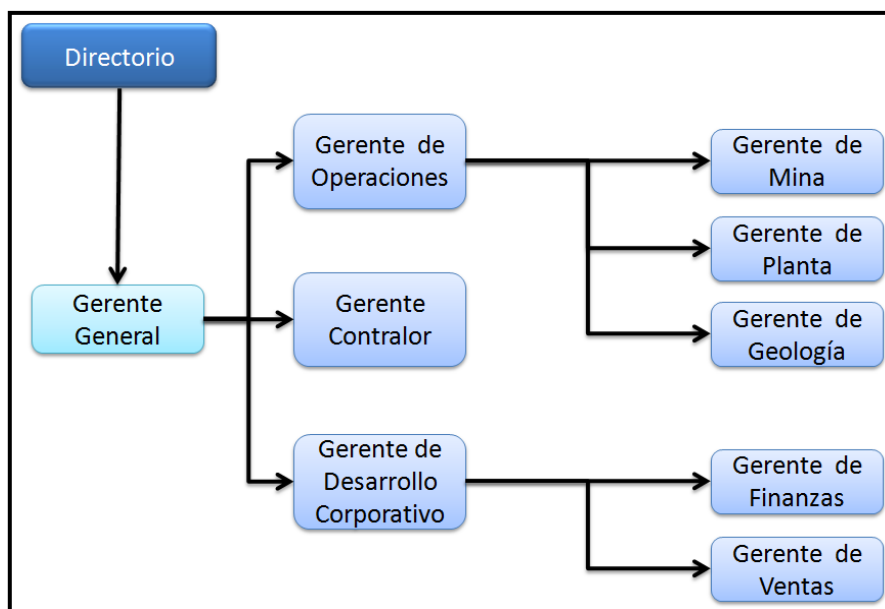


Figura 2: Estructura administrativa HMC

En lo que corresponde a la operación en la faena (en donde se desarrolla esta memoria), la gerencia de minas se divide en distintas superintendencias encargadas de los procesos internos, el desarrollo futuro y las contingencias. La figura a continuación detalla su organización:

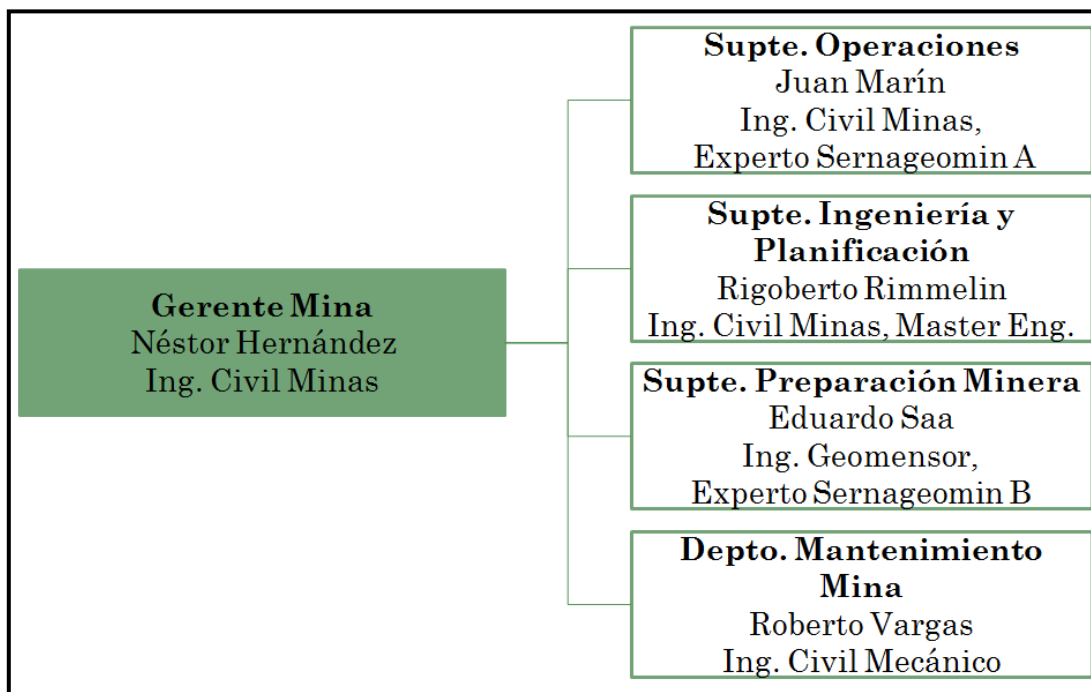


Figura 3: Estructura gerencia de Mina.

El foco de esta memoria estará puesto en la superintendencia de Ingeniería y planificación, en lo que corresponde al yacimiento subterráneo.

2.3. Yacimiento Longacho y roadheaders

A mediados del año 2007, HMC decidió llevar adelante un estudio a nivel de pre-factibilidad para la explotación del yacimiento subterráneo Longacho, mediante el uso de una tecnología no convencional (llamado proyecto Longacho Norte). El análisis buscó identificar las ventajas, contratiempos y conveniencia global de pasar del método tradicional de perforación con jumbo y tronadura a un método de extracción sin explosivos, empleando la maquinaria de excavación continua conocida como roadheader.

Los objetivos y alcances del estudio contemplaron lo siguiente:

- Caracterización del Yacimiento
- Diseño Minero
- Planificación Minera
- Plan Integrado de Producción
- Evaluación Económica del Proyecto

De dicho estudio se deslindan detalles relevantes del yacimiento, por ejemplo su caracterización de tipo exótico (proviene de un yacimiento madre tipo pórfido cuprífero,

ver anexos A y B) y su conformación espacial de tipo manto. Además se reconocen en el terreno especies minerales de cobre de tipo *copper-pitch*, *copper-wad* y principalmente crisocola (ver anexo J). Gracias al tipo de mineralización del cobre que se da en este tipo de yacimientos exóticos, es que Longacho posee leyes de extracción que se mueven en el rango de 1,5% al 3%, con un promedio de 2,25%. Los porcentajes anteriores son calificados, en el contexto general de la minería del cobre, como un muy buen rendimiento por tonelada material.

Entendiendo que la empresa tiene compromisos comerciales previamente pactados en cuanto a producción de cátodos de cobre y la dinámica del de su precio, es posible entender la relevancia de optimizar la extracción de las toneladas diarias de mineral para enfrentar el menor precio pactado con antelación y aprovechar las oportunidades comerciales actuales.

El yacimiento posee un ancho que oscila en el rango de los 300 a 400 metros en dirección este-oeste, un largo de 4,5 kilómetros en dirección sur-norte y una potencia de 5 metros de altura (ver anexo I).

En base al estudio anterior, en el año 2009 se decide dar luz verde al cambio de tecnología de explotación en Longacho. Actualmente, se encuentra en una etapa temprana de su operación con un horizonte de al menos 10 años de extracción según la programación de largo plazo. Es un yacimiento que se aborda de forma subterránea bajo el método de extracción room and pillar (ver anexo D), empleando equipos mecanizados para la extracción, fortificando el avance con pernos, mallas y *shotcrete*, para luego rellenar las labores extraídas completamente con material estéril. Posteriormente, con el material extraído, se realizan los procesos de chancado, aglomeración y curado, apilamiento, lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención para conseguir los cátodos de cobre que serán finalmente comercializados (ver anexo K).

La necesidad del desarrollo de la presente memoria nace por parte de la empresa. Con ella, HMC pretende obtener una mejor utilización de sus recursos, particularmente en lo que se refiere a las maquinarias empleadas en la extracción directa del yacimiento. Considerando que el proyecto no lleva más de un año operando y que el horizonte proyectado es de al menos 10 años, el impacto de una buena programación de la extracción en el rendimiento final del proyecto puede llegar a ser de suma relevancia.

3. MARCO CONCEPTUAL

Se definen una serie de conceptos ligados a la minería subterránea y a la metodología de resolución que se pretende emplear. Estos serán utilizados en lo que posteriormente se expone y determinan la comprensión de buena parte del trabajo desarrollado a lo largo de la memoria.

3.1. Conceptos de la industria minera

▪ Mina subterránea

Una mina subterránea es aquella explotación de recursos mineros que se desarrolla por debajo de la superficie del terreno.

La explotación de un yacimiento mediante minería subterránea se realiza cuando su extracción a cielo abierto no es posible por motivos económicos, sociales o ambientales.

Para la minería subterránea se hace necesaria la realización de túneles, pozos, chimeneas y galerías, así como cámaras. Los métodos más empleados son mediante túneles y pilares, hundimientos, corte y relleno (cut and fill mining), realce por subniveles (sublevel stopping) y cámaras-almacén (shrinkage). Una clasificación de los métodos se puede observar en el anexo C.

- **Competencia de roca**

Se denominan rocas competentes a las que demuestran poca plasticidad y alcanzan el límite de rotura sin haber llegado a sufrir una deformación plástica significativa. En contraposición, se llaman incompetentes a las rocas que muestran una alta plasticidad y que son altamente susceptibles a la deformación. Son especialmente incompetentes las rocas arcillosas o las arenas, siendo característica del yacimiento analizado la presencia predominante de roca arcillosa, por lo cual los criterios de seguridad son de particular relevancia para la extracción.

- **Potencia**

Concepto empleado en minería ligado a la dimensión de un yacimiento, particularmente relacionado con la altura del mismo dentro de la extensión que posee.

- **Mineralización**

Corresponde al proceso de formación del mineral llevado a cabo por procesos naturales por los cuales los minerales son introducidos en las rocas. En el yacimiento en estudio, la mineralización se produjo por la oxidación del cobre y posterior sedimentación. El mineral de cobre que se encuentra mayoritariamente dentro del yacimiento se denomina crisocola (o cobre silíceo). También existen otras mineralizaciones llamadas copper-pitch y copper-wad dentro de la mina subterránea (ver anexo J).

- **Cuerpo**

Este concepto está asociado a la forma en que se deposita el mineral en el terreno donde se concentra (ver anexos A y B). En el caso de estudio, el cuerpo mineralizado es de tipo manto o mantiforme con una potencia de 5 [m] de altura, una extensión de 400 [m] de ancho y 4,5 [km] de largo.

- **Caja y roca de caja**

Término empleado en minería subterránea que hace referencia a las paredes en los túneles de producción (o calles de producción). Roca de caja es aquella que conforma las paredes de los túneles al interior del yacimiento subterráneo.

- **Drift (DR)**

Término utilizado en minería subterránea para identificar las calles principales de producción, las cuales siguen una orientación espacial definida en el sentido de la veta. Los drifts son los primeros segmentos que se extraen dentro de una unidad de producción.

- **Cruzado (XC)**

Término usado en minería subterránea para definir los segmentos de las calles de producción que cruzan a los drifts. En el contexto de estudio, se define un cruzado como el segmento acotado entre 2 drifts y 2 pilares.

- **Pilar**

Estructura física cuya finalidad es garantizar la seguridad dentro de la unidad de producción, desde el punto de vista estructural y geomecánico. Su función es soportar el techo por sobre los túneles de producción, evitando que se produzcan colapsos una vez que se redistribuyen los esfuerzos dentro de la unidad a causa de la extracción del mineral. Son diseñados cuidando que no se ocasionen derrumbes.

- **Room and Pillar**

Técnica de extracción aplicada en la minería subterránea, empleada en cuerpos mineralizados mantiformes y de baja potencia. Se emplea principalmente en cuerpos donde la calidad de roca de caja y de mineral es competente. Se dejan pilares para mantener el techo y las cajas estables. Los túneles de acceso entre pilares se denominan drift y los segmentos entre pilares y drifts se denominan cruzados. Los pilares y túneles se diseñan de modo de maximizar la recuperación de mineral. Cuerpos mineralizados con potencias mayores a 10[m] y menores a 30[m] se explotan por sub-niveles desde el techo al piso. Ver anexo D para más detalles.

- **Roadheader**

Es una maquinaria empleada ampliamente en la construcción de túneles y en menor medida en la extracción subterránea de minerales, la cual permite excavar en forma continua y sin el uso de explosivos. Está compuesta por uno o dos cabezales de corte montados a un brazo hidráulico, un dispositivo de carga y un mecanismo de transporte. El equipo realiza la extracción escariando el mineral con los cabezales de corte, el cual va siendo recolectado y transportado en la medida que la máquina avanza por el túnel de producción por un mecanismo de recolección que envía el material a una correa transportadora. Una imagen del equipo puede apreciarse en el anexo G.

- **Recursos (recurso minero)**

Se define como recurso minero el suelo, los sedimentos y las rocas identificadas como mineral en el yacimiento, siempre y cuando posea ley mayor o igual a la que es económicamente viable de ser extraída bajo la tecnología de extracción empleada.

- **Reservas**

Las reservas se relacionan con el porcentaje del recurso minero que se contempla extraer del yacimiento (toneladas), dado el diseño de extracción desarrollado. Por lo general, las reservas se encuentran acotadas por las condiciones de seguridad geomecánicas pertinentes para garantizar la estabilidad de las labores. Bajo el método room and pillar, las reservas corresponden a los túneles de producción.

- **Material estéril**

Se definen así el suelo, los sedimentos y las rocas que tienen una ley menor a la que es económicamente viable de ser extraída bajo la tecnología de extracción empleada.

3.2. Conceptos de la metodología de resolución

▪ Algoritmos

Un algoritmo es el conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema. En matemáticas, ciencias de la computación y disciplinas relacionadas, un algoritmo es un conjunto predefinido de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permite realizar una actividad mediante pasos sucesivos que no generen dudas a quien deba realizar dicha actividad.

▪ Heurísticas

Una heurística corresponde, en algunas ciencias, a la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, por ejemplo por tanteo, o la utilización de reglas empíricas.

▪ Programación matemática

Conjunto de teoremas, algoritmos, métodos y técnicas para resolver problemas de optimización. Todo problema de programación matemática consta de una función objetivo (a maximizar o minimizar) y de un conjunto de restricciones modeladas por medio de ecuaciones. Cuando la función objetivo y todas las restricciones son de tipo lineal se está en presencia de un problema de programación lineal, que es la forma de programación matemática más desarrollada. Cuando alguna de las restricciones o variables que interviene en un problema de programación matemática (al menos una) es de tipo no lineal, y por más que todas las restantes sigan siendo lineales, el problema será de programación no lineal.

▪ Programación lineal (LP)

La Programación Lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema determinado, formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal.

Consiste en optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones que se expresan mediante un sistema de inecuaciones lineales.

▪ Programación no lineal (NLP)

En matemáticas, la programación no lineal es el proceso de resolución de un sistema de ecuaciones e inecuaciones sujetas a un conjunto de restricciones sobre un conjunto de variables reales desconocidas.

Al igual que en la programación lineal, se optimiza una función objetivo (maximizándola o minimizándola), pero con la importante diferencia de que alguna de las restricciones y/o la función objetivo es(son) no lineal(es).

▪ Modelos de programación matemática

Diversos problemas se pueden representar o modelar por medio de problemas de programación matemática.

Son de uso común los problemas de programación lineal (PPL), en donde el problema analizado se traduce en un modelo matemático subyacente. Estos pueden ser resueltos de forma exacta empleando algoritmos y paquetes comerciales de

resolución (como CPLEX y GAMS respectivamente). En ocasiones, los tiempos de resolución que requieren los problemas debido a su complejidad son computacionalmente elevados. Por ese motivo suelen emplearse aproximaciones razonables a la solución óptima que toman un tiempo computacional considerablemente menor, las que se conocen como heurísticas.

▪ **Problema del vendedor viajero (TSP)**

El problema del vendedor viajero es un ejemplo que muestra y analiza la problemática que subyace tras algunos tipos de problemas matemáticos que a priori parecen tener una solución relativamente fácil y en la práctica presentan un gran problema.

La respuesta al problema es conocida, es decir se conoce la forma de resolverlo, pero sólo en teoría, en la práctica la solución no es aplicable debido al tiempo que computacionalmente se requiere para obtener su resultado.

El problema del vendedor viajero (también conocido como TSP por sus siglas en inglés) es uno de los problemas más famosos (y quizás el mejor estudiado) en el campo de la optimización combinatoria computacional. A pesar de la aparente sencillez de su planteamiento, el TSP es uno de los más complejos de resolver y existen demostraciones que equiparan la complejidad de su solución a la de otros problemas aparentemente mucho más complejos que han retado a los matemáticos desde hace siglos.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La excavación del mineral de Longacho con perforación y tronadura ha demostrado no ser adecuado en términos de productividad y seguridad de las operaciones bajo la metodología tradicional. Dadas las características del terreno y del yacimiento, correspondientes a una roca arcillosa blanda y a un yacimiento de tipo exótico, el método convencional de perforación y tronadura presenta inconvenientes en cuanto a los avances por cada carga, los cuales no superan los 3 metros en cada labor. Esto último a causa de que la roca absorbe gran parte la energía liberada en una tronadura dadas las características de su conformación. Además, la seguridad de las labores se ve comprometida con cada explosión que se realice para extraer material.

Por lo anterior, se emplea un mecanismo alternativo al jumbo de perforación característico de la perforación y tronadura. Esta maquinaria se conoce como *roadheader*, el cual es un equipo de minería continua de alta capacidad utilizado comúnmente en la construcción de túneles. Presenta ventajas considerables de rendimiento en cuanto a la extracción de material en comparación al método tradicional, logrando escariar la roca avanzando un máximo de 17 metros por frente atacado (por protocolo de seguridad para los operadores del equipo) en condiciones ideales de extracción antes de fortificar y volver a operar en el mismo frente.

Contrapuesto al rendimiento que posee la maquina al extraer material, cuando se habla del traslado del equipo de un frente de extracción a otro, se observa que existen dificultades operacionales que determinan un tiempo importante que debe destinarse a tareas de perfilamiento, habilitación de servicios y al mismo transporte del equipo.

En el transcurso de la memoria, se desea desarrollar un modelo que defina la ruta o secuencia de extracción óptima, minimizando los traslados de los equipos roadheader. Lo anterior pretende incrementar las toneladas de producción total diaria, al emplear menos tiempos en traslado y más en producción.

4.1. Justificación

El principal inconveniente de los roadheader radica en el tiempo asociado al traslado de la maquinaria al ir de un punto de extracción a otro. Por sus dimensiones no son fáciles de mover en grandes distancias dentro de la mina, presentando importantes restricciones operativas en cuanto al desplazamiento al interior. Además, se encuentran limitantes derivadas de las operaciones extractivas y del diseño minero contemplado para la explotación del yacimiento por medio del mecanismo room & pillar mecanizado con relleno estéril posterior.

Muestras de lo anterior se tienen de los datos y estadísticas operacionales, en donde se aprecia que un turno de operarios (con duración de 12 horas) tiene un avance máximo registrado de 8 metros lineales y con un mínimo de 1 metro lineal en las distintas labores, llegando a un promedio de avance de 4 metros lineales (equivalentes aproximadamente a 400 toneladas de material, lo que con una ley promedio del 2,25% se traduce en una extracción de aproximadamente 9 toneladas de cobre por equipo diarias)¹.

Estos antecedentes de rendimiento contemplan implícitamente tanto los traslados de los equipos como las habilitaciones de servicios eléctricos y de ventilación (necesarios para que la máquina opere normalmente cambiándose de una postura a otra en el layout de diseño para la explotación), factores que tienen un impacto no despreciable a la hora de determinar cual sección del diseño debe ser extraída efectivamente por la operación.

Según estimaciones realizadas por una empresa consultora sobre el rendimiento del equipo, la extracción debería ser de 1200 [tdp] en condiciones ideales, por lo que la estrategia de selección de labor a explotar tiene un carácter decisivo a la hora de evaluar la productividad. Adicionalmente, el traslado de una postura a otra requiere un tiempo directamente proporcional a la distancia entre los puntos de partida y de destino, contemplando en ello las maniobras para mover la máquina, el cableado, la distancia a recorrer y otros obstáculos. Los factores descritos son los que motivan el desarrollo de un modelo que agende la secuencia de explotación de los equipos optimizando la extracción al minimizar los traslados entre puntos.

Confeccionar un modelo con las características anteriores significa para la empresa aspirar a una mejora en las operaciones productivas, basándose en criterios objetivos para optimizar los procesos extractivos en búsqueda de aumentar la cantidad de material obtenido desde un punto de vista de rendimiento, minimizar tiempos y distancias de traslado de las maquinarias, junto con la optimización de la habilitación de los servicios necesarios para la producción.

Lo expuesto es de gran relevancia, considerando los compromisos comerciales adquiridos por HMC hacía el futuro con sus clientes y a la dinámica volátil que tiene el

¹ Información proporcionada por la empresa.

precio del metal, con lo que cualquier ahorro en costos y en tiempos de explotación (aún cuando sea de carácter marginal) se traduce en una mejor posición para enfrentar las contingencias del mercado, junto con importantes ingresos para la empresa dado el rubro en el que se encuentra. Esto queda de manifiesto en las proyecciones que realiza Cochilco para el precio del metal, la cuales en el mes de julio de 2010 se establecieron a la baja en (4). Por otro lado, las proyecciones realizadas por distintos bancos de inversión durante el mes de septiembre de 2010 para los próximos años del precio del metal, en particular las que se manejan para el año 2011, sitúan su valor en un rango que va de los 350 [¢/lb] a los 400 [¢/lb] muy por sobre el valor para el mes de septiembre de 2010 según (5). Ya en el mes de diciembre de 2010, se ha superado la barrera de los 400 [¢/lb], llegando a un valor máximo histórico de 413,495 [¢/lb] según (6).

Con esto se hace visible la importancia de tener una buena programación de las operaciones para enfrentar de buena manera la volatilidad del precio del metal en base a los compromisos existentes y a las oportunidades que presente el mercado.

Considerando que el proyecto no lleva más de un año operando con el nuevo sistema de extracción y que el horizonte proyectado es de al menos 10 años, el impacto de una buena programación de la extracción en el resultado final del proyecto puede llegar a ser de suma relevancia bajo la mirada de la maximización de la extracción.

Además, se debe contemplar la próxima aprobación del royalty minero para la reconstrucción del país, el cual se mueve en un rango desde un 5% y hasta un 14% sobre la base de los márgenes operacionales (desde un 35% y hasta un 85% respectivamente) y que posiblemente afecte a esta compañía de la mediana minería.

HMC pretende obtener una mejor y mayor utilización de sus recursos en lo que a extracción se refiere, particularmente en lo que se relaciona con las maquinarias de mayor relevancia en la explotación del yacimiento y al personal involucrado en la operación.

4.2. Enfoque de la solución

La resolución del problema se centra en la programación de maquinaria de excavación para cada unidad de explotación del yacimiento subterráneo.

Se contempla que el diseño y confección del modelo de programación matemática esté centrado en la resolución independiente de cada unidad del yacimiento, definiendo planes dinámicos a partir de la situación actual de explotación de cada sector.

Las alternativas de implementación pasan por:

- Modelos de flujo en redes que identifiquen la ruta más corta para el problema de movilización del equipo, maximizando las toneladas diarias de material sacadas por el roadheader, cargadas por los LHD o cargadores frontales y transportadas por los camiones.
- Modelos de transporte, los que se analizan con especial cuidado. La posibilidad cierta de abordar el problema intentando solamente minimizar el tiempo de movilización de los equipos, considerando un costo de no producir y el beneficio por estar utilizando y movilizándolo a la vez la maquinaria hacen

tentador concentrarse solamente en el traslado. Se debe tener cuidado con despreciar factores del negocio de relevancia.

Así, el proceso productivo y el levantamiento de información del mismo darán luces sobre las variables críticas del problema y las consideraciones necesarias, junto con las restricciones derivadas del equipamiento y de la operación misma.

Con la información relevante recopilada y simplificando la situación operacional a un nivel que sea de utilidad para la generación posterior del modelo, se pretende confeccionar el modelo de programación matemática y luego resolverlo mediante el software GAMS y el solver CPLEX respectivamente (idealmente).

La metodología desarrollada se especifica en el capítulo 6.

4.3. Objetivos y alcance

En lo que sigue, se enuncian el objetivo general y objetivos específicos de la memoria. Luego se detalla el alcance de la misma en el transcurso del trabajo a realizar.

4.3.1. Objetivo general

El objetivo general contempla mejorar las secuencias de extracción mediante la resolución de un modelo de programación matemática para el proyecto Longacho Norte, con foco especial en el corto plazo.

4.3.2. Objetivos específicos

En cuanto a los objetivos específicos que contempla el desarrollo de la memoria, se tienen los siguientes:

- Aumentar las toneladas por día de material extraído del yacimiento
- Disminuir los traslados para los equipos de excavación continua.
- Disminuir los tiempos de extracción de cada panel.
- Respetar y resguardar los estándares de seguridad establecidos para la operación.
- Tiempos de resolución bajos en relación al proceso de planificación de corto plazo.
- Posibilidad de análisis de sensibilidad de la solución.

4.3.3. Alcance

La memoria se enmarca en desarrollar el modelo subyacente para determinar las secuencias de extracción que minimizan los traslados de las maquinarias críticas del proceso extractivo para cada unidad a explotar en el yacimiento.

Se espera resolver el modelo por medio de una heurística, dada la complejidad que puede llegar a alcanzar el problema en cuanto a las diferentes dimensiones que se vislumbran. Soluciones exactas del problema se evaluarán en la medida que sea factible dados los recursos disponibles, pero se piensa que éstas escapan al desarrollo de la memoria aunque se aspira obtener soluciones exactas del problema.

Es necesario recordar que el modelo pretende asistir al personal de planificación en la determinación más conveniente de la explotación de corto plazo, y los tiempos computacionales de resolución del problema suelen ser extensos en el caso de problemas como el abordado.

Finalmente, se pretende desarrollar e implementar el modelo para una unidad productiva nueva (sin labores de explotación desarrolladas) y otra ya explotada, con objeto de contrastar resultados y realizar una evaluación en términos de la mayor producción que se podría generar utilizando esta herramienta y otras ventajas derivadas de su utilización.

5. METODOLOGÍA GENERAL

La metodología consta de una serie de procesos dependientes e independientes para el desarrollo de la memoria y la resolución de la problemática que la genera.

El proceso para la confección del modelo contempla un trabajo dedicado en la faena misma, junto a diversos profesionales y áreas relacionadas. Es así como planificación y operaciones presentan interacciones críticas a la hora de realizar el diseño y será fundamental integrarlas al modelo para un ajuste más cercano a la realidad y a las posibilidades que ofrece cada una.

Se pretende construir un modelo matemático de la mina representativo de la secuencia de producción que realizan los equipos mineros (ciclo productivo). Además, es necesario determinar las restricciones del modelo desde el punto de vista de operaciones (equipos), geomecánico (estabilidad) y las derivadas del conocimiento del problema in situ.

En el desarrollo de lo anterior, se implementará el modelo en una plataforma computacional adhoc (GAMS inicialmente), para generar planes de corto y mediano plazo (foco en el corto plazo), optimizando la extracción de mineral, minimizando los traslados de los equipos de excavación continua.

Para conseguir lo expuesto se plantea la confección del modelo en forma iterativa, comenzando con un modelo simple que sea perfectible en el tiempo identificando factores relevantes del proceso productivo o que alteren el desempeño del mismo. En cuanto a la planificación entregada por el modelo, debe desarrollarse en pos de evaluar el impacto final en contraste con la metodología actual.

Se consideran las siguientes actividades en el tiempo de desarrollo de la memoria:

- **Comprensión del problema de negocio**

Rondas de discusión con gente de la empresa para comprender la forma en la que operan, la dimensión global de la problemática y las vías posibles de resolución.

Se contemplan inspecciones de la faena en su desarrollo, la coordinación entre áreas de planificación y operaciones, charlas con el equipo de mantención y aspectos ligados al desempeño de la maquinaria.

- **Revisión de bibliografía para el levantamiento de información**

Revisión y selección de memorias, papers y libros de utilidad para el proceso de confección futuro del modelo o heurística.

Identificación de soluciones útiles para el desarrollo de la memoria y de la información importante para el propósito de la misma.

- **Determinación de variables relevantes**

Identificar los aspectos fundamentales de la operación en pos de establecer las variables relevantes para el posterior modelamiento.

- **Levantamiento de información operativa**

Recolección, filtro y selección de la información relevante para abordar el problema. Esto se logra revisando los datos existentes (limpieza de datos) y con reuniones con diverso tipo de trabajadores de la empresa.

- **Delineamiento de soluciones actuales**

Determinar los procesos que se usan actualmente para definir las rutas de extracción y la asignación de maquinarias en las faenas de extracción. Se pretende descubrir existencia de patrones en el proceso que puedan ser de provecho para el posterior modelamiento.

- **Modelamiento del problema**

Desarrollo de PPL asociado al ruteo de las maquinarias, al layout, estudio geotécnico, a las restricciones operativas, tiempos, plazos, compromisos comerciales y otros derivados de la actividad. Este proceso es central y su confección debe obedecer a un desarrollo iterativo del modelo.

- **Obtención de cotas, soluciones y heurísticas**

Determinar la secuencia de extracción asociada al problema, a partir del modelo desarrollado, por medio de cotas derivadas de la relajación del problema, heurísticas o la resolución del problema en la medida que sea posible.

- **Validación y comparación**

Comparar lo desarrollado con la situación actual, viendo los tiempos involucrados o los metros recorridos (costos), las toneladas extraídas, etc. Contrastar el desempeño del modelo con las metodologías empleadas en la actualidad y ver el aporte que significa su aplicación (beneficio esperado). Para conseguir lo anterior, se contrastará la información existente de una unidad productiva explotada y la solución arrojada por el modelo. Además, se planificará una unidad no explotada para ver el desempeño del modelo hacia adelante.

5.1. Plan de trabajo

En cuanto al transcurso de cada una de las actividades propuestas, se ha desarrollado un trabajo dentro de las posibilidades existentes a distancia. Lo anterior implica la revisión de memorias y tesis desarrolladas por alumnos del departamento y de otras universidades en el tema durante años anteriores y algunos papers relacionados con el método extractivo empleado en la mina.

Se entra en profundidad a comprender el sistema productivo estando instalado el memorista en la zona, llevándose a cabo inducciones en las diversas áreas involucradas en la producción (desde el diseño hasta la ejecución). Lo expuesto ocurre desde el día primero de septiembre del presente año en adelante, fecha en la cual el memorista ingresa formalmente a la empresa.

La carta Gantt siguiente establece la relación temporal tentativa de las actividades contempladas en la metodología, teniendo en mente las 15 semanas que componen el semestre de primavera 2010 más la semana de vacaciones de fiestas patrias:

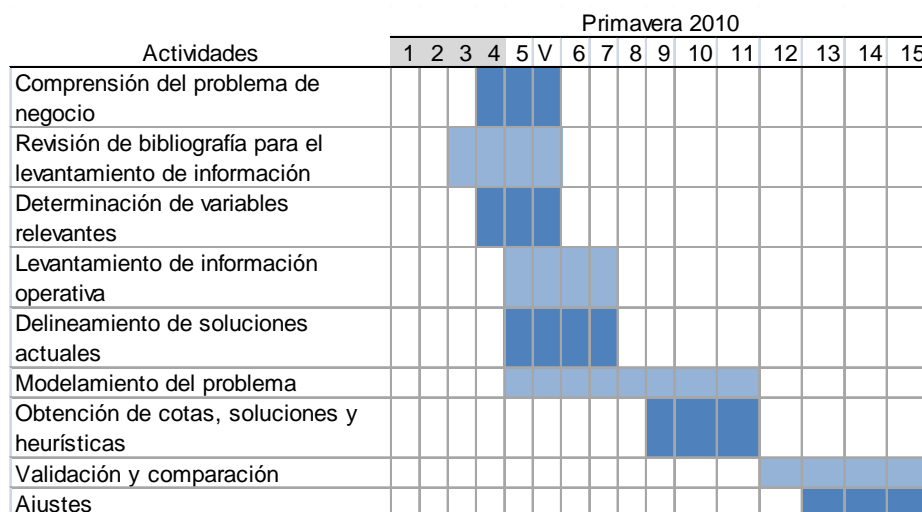


Figura 4: Carta Gantt memoria.

5.2. Resultados esperados

Del desarrollo de la memoria se espera obtener un modelo de programación matemática que decida la secuencia de extracción en el corto plazo, permitiendo al área de planificación ajustar los planes dadas las nuevas contingencias y el trabajo ya realizado.

Ligado a lo anterior, se espera obtener distintas soluciones ajustadas a la nueva información que se presente, posibilitando una reacción del área de planificación con el área de operaciones a la hora de redefinir los cursos de acción por causas comunes como inestabilidad o inseguridad de ciertas áreas.

Por otra parte, se desea conseguir patrones característicos del layout de las unidades. Se espera que dichos resultados apliquen como ley de acción a la hora de definir las secuencias extractivas.

Al aplicar la solución entregada por el modelo, se espera aumentar las toneladas de material extraído, reducir los traslados ociosos de la maquinaria, distribuir de mejor forma las mantenciones y programar eficientemente el funcionamiento de los equipos.

Finalmente, se espera ajustar las metas de producción y de cumplimiento de procesos en base a la compatibilización de tareas que el modelo busca implementar.

6. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

6.1. Planificación minera

La planificación minera consiste en ensamblar, adecuadamente, todas las variables que permiten la extracción de un mineral. Previamente se requiere de un diseño que ejecute los procedimientos de extracción (recursos, personas, equipos). Adicionalmente a ese diseño, es necesario realizar la programación respectiva, es decir, ver qué cosas van a suceder, en qué momento y con qué secuencia.

Ella contempla diferentes horizontes temporales, los cuales apoyan diversos tipos de decisiones. Ellos son la planificación de largo plazo, la planificación de mediano plazo y la planificación de corto plazo.

- **Planificación de largo plazo:** Es la que se encarga de definir tamaño y vida útil de la mina, junto con determinar las reservas de la misma. De ella se define la inversión y los costos asociados a la explotación del yacimiento. Para dicho horizonte se define la envolvente económica, el método, ritmo y secuencia de explotación macro, el perfil de leyes de corte y fundamentalmente la inversión y los costos para poder traspasar la mayor información posible a los inversionistas, incorporando proyectos con diferentes niveles de riesgo.
- **Planificación de mediano plazo:** Dentro de ella se adaptan los modelos que sustentan la planificación de largo plazo, generando planes de producción que conduzcan al área encargada de la operación a las metas de producción definidas. El resultado obtenido en este horizonte, permite adaptar la definición de negocios de la mina mediante el reemplazo de infraestructura, reconocimiento de nuevos recursos y proyectos de contingencia.
- **Planificación de corto plazo:** Por medio de ella se realiza la recopilación y utilización de la información operacional, de modo de retroalimentar la planificación de mediano plazo. Aquí son analizados los recursos empleados en la operación minera en un horizonte de tiempo próximo, de tal forma de soportar el presupuesto de operaciones de la misma.

6.2. Principales procesos de operación dentro de la mina subterránea

En pos de realizar la extracción del mineral existente en el yacimiento, es necesario que se realicen diversas acciones tendientes a garantizar la operatividad de los equipos de excavación, las condiciones de ventilación ideales para la permanencia de los operadores de los equipos y las tareas ligadas a la seguridad y estabilidad de los frentes de extracción en el tiempo.

Dentro del ciclo productivo se contemplan el proceso de extracción, luego el de fortificación y finalmente el de relleno. La extracción del yacimiento involucra procesos de habilitación de servicios e infraestructura para las máquinas de excavación y la posterior extracción del mineral. La fortificación engloba los procesos para resguardar la estabilidad de los frentes que se extraen. Finalmente, el relleno de las labores completamente extraídas y que no sean necesarias para el futuro.

En detalle y apuntando netamente al proceso productivo, se contempla lo siguiente:



Figura 5: Diagrama del proceso productivo.

Un esquema del proceso productivo con una representación gráfica de los equipos empleados puede ser apreciado el anexo E.

A continuación se explican cada una de las instancias involucradas en las etapas del proceso productivo.

6.2.1. Extracción

Dentro del proceso de extracción se agrupan todas las acciones necesarias para que las reservas de mineral sean explotadas. Son realizados procesos de acuerdo al diseño de proyecto, buscando cumplir con la meta diaria de producción. La extracción contempla los siguientes procesos:

- **Habilitación de servicios:** Involucra toda la instalación previa de servicios eléctricos (subestaciones y cableado) para los equipos de excavación continua y fortificado. Además se realizan la habilitación de los servicios de ventilación y de drenaje necesarios para poder producir al interior.
- **Escareado:** Es el proceso que desarrolla el equipo de excavación continua (roadheader) para explotar el mineral. Por medio de sus cabezales de corte y las picas de escareado que tiene cada cabezal, el equipo produce marina (material derivado de cualquier mecanismo de excavación, ya sea por perforación y tronadura, acuñadura, escareado, etc.) la cual queda disponible para los procesos posteriores.
- **Carga:** Por medio de LHD y también por cargadores frontales, se transporta la marina desde el punto de extracción a los camiones que llevan el material al chancado primario.
- **Traslado:** Camiones de una capacidad de 23 toneladas aproximadamente transportan la marina desde el punto de carga a los procesos productivos posteriores, que terminarán en la obtención de cátodos de cobre.

6.2.2. Fortificación

Con respecto al proceso de fortificación, su objetivo primordial es asegurar la estabilidad de los frentes mientras se realicen faenas de extracción al interior de las unidades. Se busca asegurar tanto la seguridad de los operadores de los equipos como la producción comprometida para el corto plazo, minimizando los riesgos de que ocurra

un desprendimiento, derrumbe o colapso de pilares, techo o cajas en las distintas calles que conforman la unidad por diseño.

En pos de lo anterior, los procesos que abarca la fortificación son:

- **Acuñadura:** Ya sea empleando el equipo mecanizado de acuñadura o un equipo de levante con un operario que realice la acuñadura de forma manual, se busca desprender de los techos y las cajas el material que se encuentra suelto y que puede caer sobre los operadores o sobre las máquinas, lo que representa un peligro cierto para la integridad de los trabajadores que ingresen a la mina y para la continuidad del proceso de explotación. La idea de fondo es dejar compacto el estrato próximo para que los procesos posteriores de fortificación se realicen de buena forma y cumplan su función.
- **Instalación de pernos:** Para desarrollar este proceso debe haber sido realizada la acuñadura previamente. Se cuenta con equipos mecanizados que instalan en una sección transversal del túnel una cantidad que va desde 8 y hasta 10 pernos de 2,40[m] o 3,2[m] dependiendo de las necesidades de fortificado de cada una de las calles que se extraen. Lo que se busca con los pernos es dar estabilidad a las cajas y a los techos cada cierta cantidad de metros.
- **Instalación de malla:** Este proceso requiere que se hayan instalado pernos previamente en la zona que será puesta la malla. Lo que busca la instalación de este elemento de seguridad es resguardar la integridad de los operarios y de las maquinarias ante posibles desprendimientos de roca y de planchones de terreno de mayores dimensiones, conteniendo su caída hasta la cantidad de peso que soportan por metro cuadrado instalado.
- **Shotcrete:** Luego de haber instalado la malla de protección de desprendimientos y cuando la evaluación de la condición de las galerías (túneles) o pilares dice que requieren de mayor apoyo para asegurar la estabilidad, se aplica mortero a las cajas y techo con una maquinaria especial que bombea la mezcla de cemento y otros aditivos a una presión que logra que ésta se adhiera en la forma que posee la sección de caja o de techo. Al secarse el shotcrete se crea una capa que reviste el techo o la caja a la cual se le ha aplicado el material, aumentando la resistencia de las labores ante movimientos de la mina y los distintos esfuerzos internos producidos por la extracción del mineral.

6.2.3. Relleno

Habiéndose realizado el proceso de fortificación y dependiendo de la necesidad posterior de los equipos de transitar por las distintas galerías y caminos, se procede al relleno de las labores en caso de que no sea necesario acceder a determinado punto para llegar a otro. La finalidad es dar soporte a los pilares y a las cajas de los túneles extraídos, aumentando su estabilidad al redistribuirse los esfuerzos de las zonas que se encontraban vacías antes del relleno. El motivo para rellenar obedece a una necesidad geomecánica de controlar el máximo volumen abierto al interior de cada unidad de extracción para que no se comprometa la estabilidad de la misma y colapse por falta de soporte interno. Así, cuando se está por alcanzar el nivel crítico de volumen de material extraído, se procede a rellenar ciertos sectores de la unidad para poder excavar otros

túneles, similar a lo que ocurre en un proceso de nacimiento y muerte, en donde la velocidad de relleno es superior a la velocidad de extracción en este caso.

Para el relleno se utiliza material estéril que ha sido sacado de accesos de desarrollo o de la producción de cátodos. Luego se compacta con buldócer en caso de ser requerido.

6.3. Restricciones de la operación

Se contemplan las siguientes consideraciones para la planificación de la secuencia de extracción de las unidades:

- Para abrir un nuevo bloque, los predecesores deben haber sido explotados. Esta condición obedece a la restricción física de acceder a un punto siempre y cuando exista un volumen abierto que permita llegar a dicho lugar.
- Baja velocidad de transporte de los equipos relevantes para la extracción, (roadheader). Estos no superan los 250 [m/hr] trasladándose sin extraer material. En las condiciones de operación del yacimiento, esta distancia se reduce drásticamente al ser necesarios procesos de perfilamiento del equipo para acceder a las distintas posturas de las calles de producción.
- Se requiere que los servicios eléctricos, de ventilación y drenaje se encuentren habilitados en el frente a excavar para poder emplear los distintos equipos del proceso productivo. Esto se traduce en un tiempo de “instalación” necesario para los equipos.
- Para abrir un cruzado (segmento entre 2 drifts), debe hacerse en el sentido favorable de acceso de la máquina con el pilar, el cual corresponde al vértice del pilar con ángulo interno superior a 90°.
- El máximo avance que se tiene por cada calle antes de fortificar es de 17 [m], que corresponde al largo de la máquina hasta el punto dónde el operador fuera de la cabina reforzada queda ubicado bajo la zona previamente fortificada. Es una restricción de seguridad para resguardar a dicho operador.
- Se debe fortificar el avance realizado por la máquina en cada galería antes de volver a excavar en dicha calle.
- Es recomendado tener abiertos un máximo de 4 drifts simultáneamente (en paralelo). Esto obedece a una condición estructural del máximo volumen extraíble sin que se comprometa la estabilidad de la unidad de extracción.
- No se puede tener el Roadheader junto con los equipos de fortificación en la misma calle, por las interferencias que ocasionan entre ellas tanto por temas estructurales como por aspectos operacionales de la extracción y el volumen que ocupan dentro de cada calle de producción.

- Se poseen 2 equipos roadheader y cada uno utiliza 1000 volts para operar, siendo necesaria una subestación propia solo para estos equipos. Dicha subestación debe ser instalada al interior de la unidad antes de que los equipos operen y deben desarrollarse los puntos de conexión en cada uno de los accesos a la unidad contemplados por proyecto.
- El proceso de acuñadura de los techos y cajas es fundamental para la fortificación y seguridad de las labores y frentes. Será inútil realizar los procedimientos posteriores (de fortificación) si se evade este procedimiento. La acuñadura fija una condición de partida para comenzar el proceso de fortificación.
- El proceso de instalación de pernos es el siguiente dentro del procedimiento de fortificación. Nunca debe realizarse antes del proceso de acuñadura.
- El proceso de instalación de malla sigue al de instalación de pernos dentro del procedimiento de fortificación, nunca antes.
- En zonas con bajo factor de seguridad se realiza aplicación de shotcrete para incrementar la resistencia de la galería.
- Cada turno consta de 22 operarios que ingresan a la faena distribuyéndose en las distintas labores y maquinarias. Se asumirá para el desarrollo de la herramienta que se cuenta con los operarios mínimos necesarios para la manipulación de los equipos.
- Tanto el roadheader como, acuñadores y empernadores necesitan de 3 operadores como mínimo.
- Equipos de levante para acuñadura no mecanizada e instalación de malla necesitan 2 operadores como mínimo.
- Existen 2 turnos de operarios (turno A y turno B) con una duración de 12 horas diarias, de las cuales en producción se emplean como máximo 10 horas descontando el tiempo de almuerzo, desayuno y aseo personal. Este tiempo se distribuye en funciones de perfilamiento de los equipos, excavación, traslado, extracción, fortificación, relleno y otros relacionados con la extracción de mineral.
- Las horas efectivas de trabajo de la máquina roadheader excavando en cada turno corresponden a 4,5 horas.
- El rendimiento operacional (teórico) del equipo roadheader excavando es de 80 [m³/hr].
- El rendimiento operacional del equipo roadheader excavando en las condiciones de operación del mineral (real medido en faena) es de 40 [m³/hr]

- Los equipos LHD tienen una capacidad de carga de 6 [ton] dada por el tamaño del balde de carga. El rendimiento teórico del equipo es de 450 [ton/hr].
- El rendimiento del equipo LHD en las condiciones de operación del yacimiento es de 200 [ton/hr].
- Los camiones de carga que trasladan el mineral o el material estéril desde el yacimiento al exterior, cuentan con capacidad de 23 [ton].
- Los camiones de traslado de material pertenecen a una empresa externa que presta el servicio de transporte.
- Para desarrollar cada uno de los procesos involucrados en la extracción de mineral del yacimiento (extracción, fortificación y relleno) no se puede tener máquinas que hagan distintos sub-procesos en forma simultánea dentro de un mismo drift o cruzado de producción (por las dimensiones de cada equipo).

6.4. Marco teórico y metodológico

Para el modelamiento del problema, es necesario comprender el diseño de proyecto de las unidades para la extracción del mineral, el cual dará los lineamientos para la confección del modelo en una primera instancia.

6.4.1. Marco teórico

Longacho es un yacimiento que requiere emplear una planificación de extracción pensando en un avance horizontal. La excavación de cada una de las unidades extractivas se realiza con un sentido de avance en dirección sur-norte, por lo que los diseños de la extracción se expresan con una vista en planta. A este diseño se le llama layout.

En la figura siguiente, es posible reconocer el diseño desarrollado para una de las unidades extractivas, con vista en planta dentro del yacimiento:

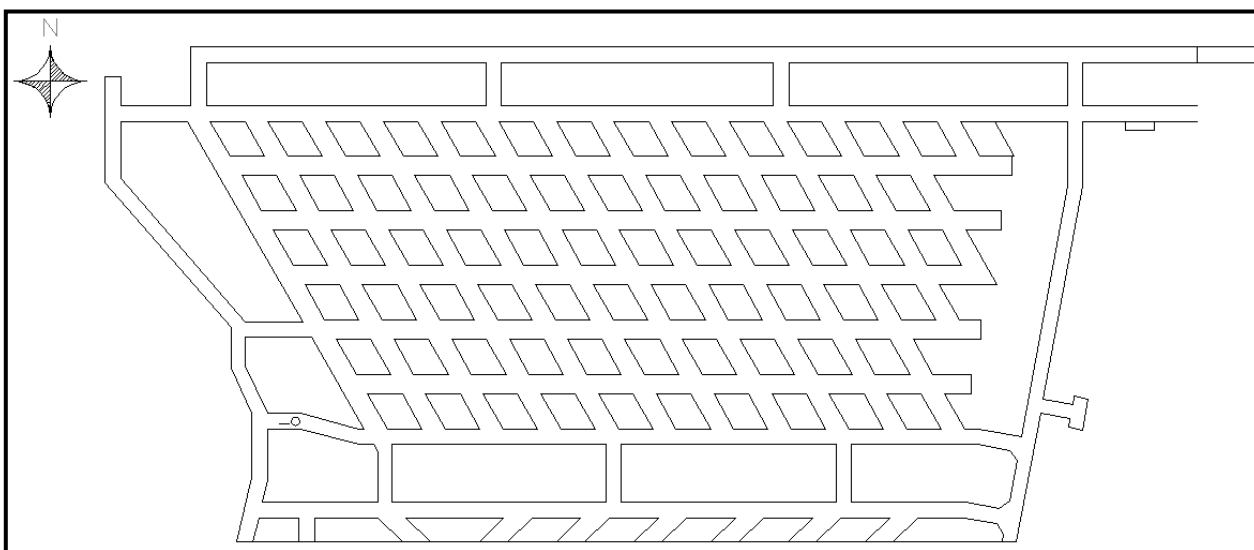


Figura 6: Plano en planta del diseño de proyecto para unidad extractiva.

Como el cuerpo del mineral se encuentra espacialmente en forma de manto (depósito exótico), se realiza la extracción del mineral por medio de un mecanismo perteneciente a la familia de métodos soportados por pilares (ver anexo C).

HMC emplea en Longacho el método room and pillar. A diferencia de otros yacimientos donde se ha empleado el método, dentro de Longacho la calidad de la roca es mala en cuanto a su competencia. El método exige que la competencia de la roca sea alta, al contemplar la resistencia a los esfuerzos por parte de los pilares para que las calles de producción no colapsen. Es por lo anterior que los pilares y las barreras de seguridad se diseñan con un margen mayor, junto con ser necesarios procedimientos de fortificación de cada una de las calles de producción contempladas en el diseño.

La idea del proceso de extracción bajo el método room and pillar en Longacho es ir construyendo túneles, dejando pilares y barreras que acotan el interior y el contorno de la unidad extractiva respectivamente. Se desarrollan caminos de acceso a cada una de las unidades de producción, los cuales no serán contemplados como parte de la resolución del problema (en lo que corresponde a la extracción).

En la figura siguiente se detallan las principales componentes del método de extracción, que son drifts, cruzados, pilares y accesos dentro del layout del plano de proyecto:



Figura 7: Simbología layout bajo método room and pillar.

Las máquinas de excavación continua inician la extracción del mineral desde los puntos de acceso en los bordes de la unidad hacia el interior por los drifts (calles de producción principal) y luego, una vez que se encuentren abiertos, se procede a abrir los cruzados (segmentos entre drifts). El orden de extracción de los cruzados depende del sentido de ingreso a los drifts (desde que punto de acceso se viene). Si se ingresa

desde un punto de acceso en el sur (sentido de avance sur-norte) el sentido de extracción de los cruzados será desde el este hacia el oeste, partiendo por el cruzado que se encuentre más al norte y finalizando por el cruzado más próximo al punto de acceso por el que se ingresó. Cabe señalar que definido el sentido de ingreso a los drifts, es posible acceder a los cruzados desde sólo uno de los drifts adyacentes. En caso de que el ingreso al drift sea por un acceso al norte (sentido de avance norte-sur), la extracción de los cruzados se realiza en sentido oeste-este y nuevamente en orden inverso al ingreso, partiendo por el más distante y terminando por el más cercano al punto de acceso. La siguiente figura explica visualmente la secuencia de apertura de cruzados en base al sentido de ingreso al drift:

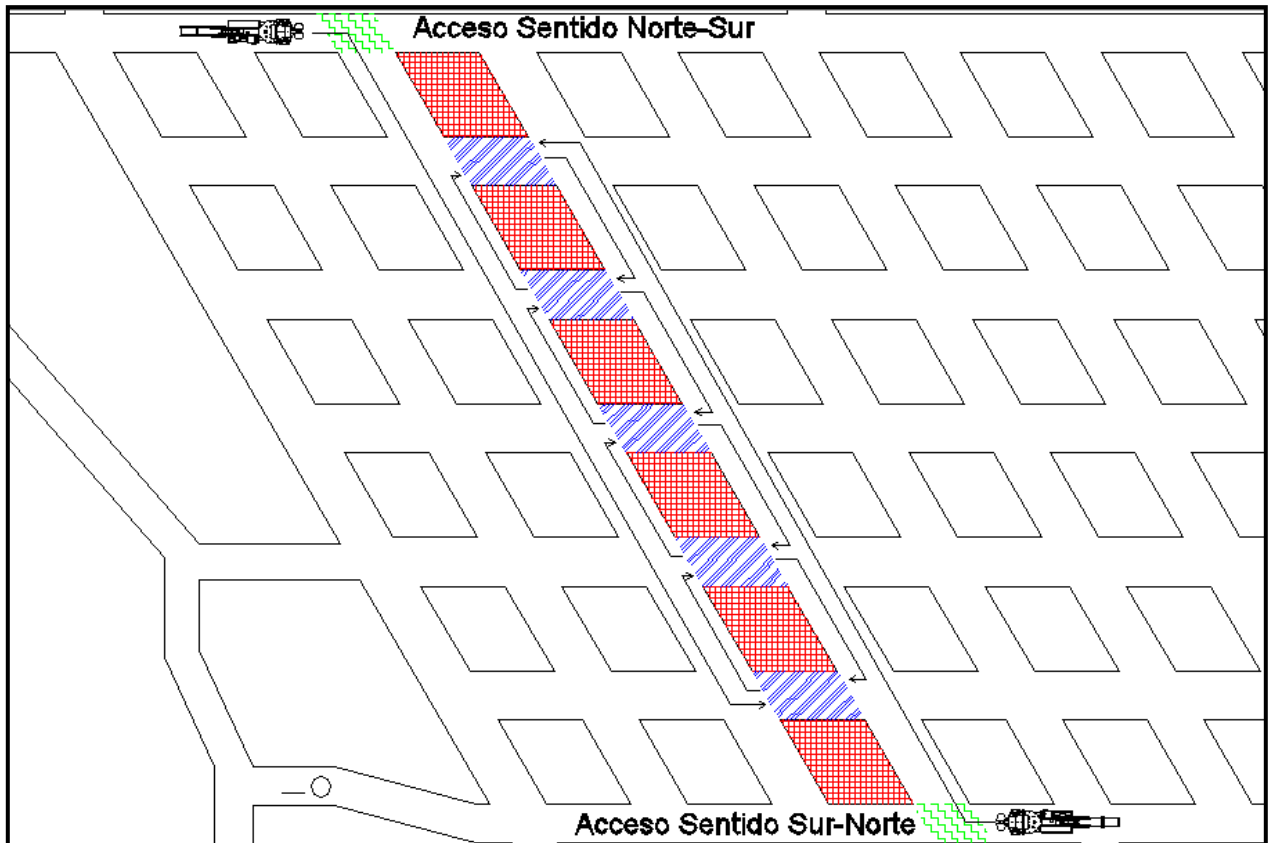


Figura 8: Secuencia de apertura de cruzados.

Cada drift tiene un largo lineal de aproximadamente 125[m], los cruzados entre drifts tienen un largo de 12[m] cada uno. La máquina avanza un máximo de 17[m] antes de cambiar de postura (atacar un nuevo drift o cruzado, distinto al actualmente excavado) para resguardar al operador encargado de mover el cable de la máquina. Así el roadheader debe trasladarse a otro frente para que el equipo de fortificación haga su función.

El proceso anterior se encuentra restringido a la habilitación previa de los servicios de electricidad, ventilación y drenaje respectivos (tampoco se profundizará en estos aspectos en el desarrollo del modelo y se asumen como un tiempo constante necesario para iniciar la operación de extracción).

Actualmente, cada unidad posee dimensiones que oscilan dentro de los 100x300 a 100x400 mts², lo cual determina la cantidad de calles internas, las dimensiones de los

pilares, de las barreras y en sí el área abierta máxima a ser extraída antes de que sea necesario rellenar labores para seguir extrayendo material (definido por el equipo de geomecánicos).

6.4.2. Marco metodológico

El procedimiento realizado para modelar matemáticamente el proceso productivo al interior de la mina subterránea consta de varios intentos principales para describir la unidad de producción, refinando la forma de atacar el problema y llegando a un modelo con menor cantidad de variables por periodo de análisis.

La solución desarrollada emplea elementos desprendidos del análisis de cada una de dichas aproximaciones, llegando a un diseño del modelo posterior que contempla una simplificación con representatividad del proceso productivo. Las aproximaciones son las que se describen en lo que sigue.

▪ **Primera aproximación**

La fase inicial buscó discretizar el panel analizándolo con una forma regular, a la cual posteriormente se le definirían los bloques aptos para ser extraídos y cuáles corresponderían a la infraestructura necesaria para que la unidad de extracción no colapse antes de sacar las reservas existentes en cada una. Se generó una matriz de n filas y m columnas cuyos valores dependen de la unidad que se analice puntualmente.

Gráficamente para el panel 15E luce así:

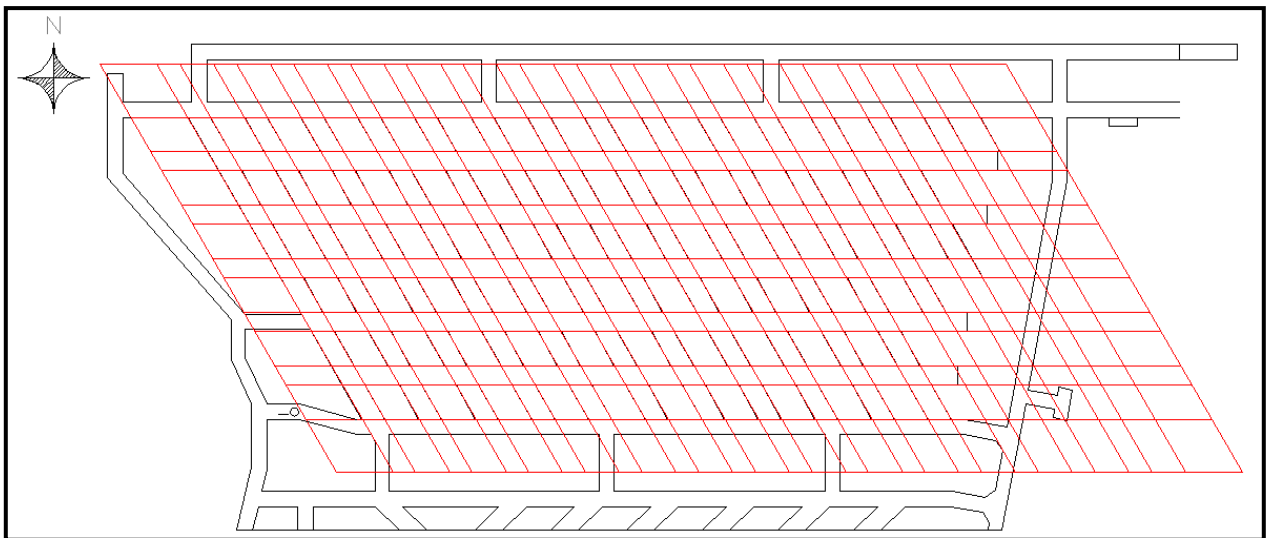


Figura 9: Discretización gráfica de unidad 15E.

Posteriormente, se rellena la matriz generada con valores 1 y 0, donde 1 corresponde a las zonas que por diseño son factibles de explotar y 0 las que nunca se deben extraer. En la figura siguiente se aprecian sectores en color negro y azul, donde el color negro identifica los sectores explotables por diseño y los sectores azules representan los que nunca se deben extraer por ser infraestructura para el sustento de la unidad durante la extracción.

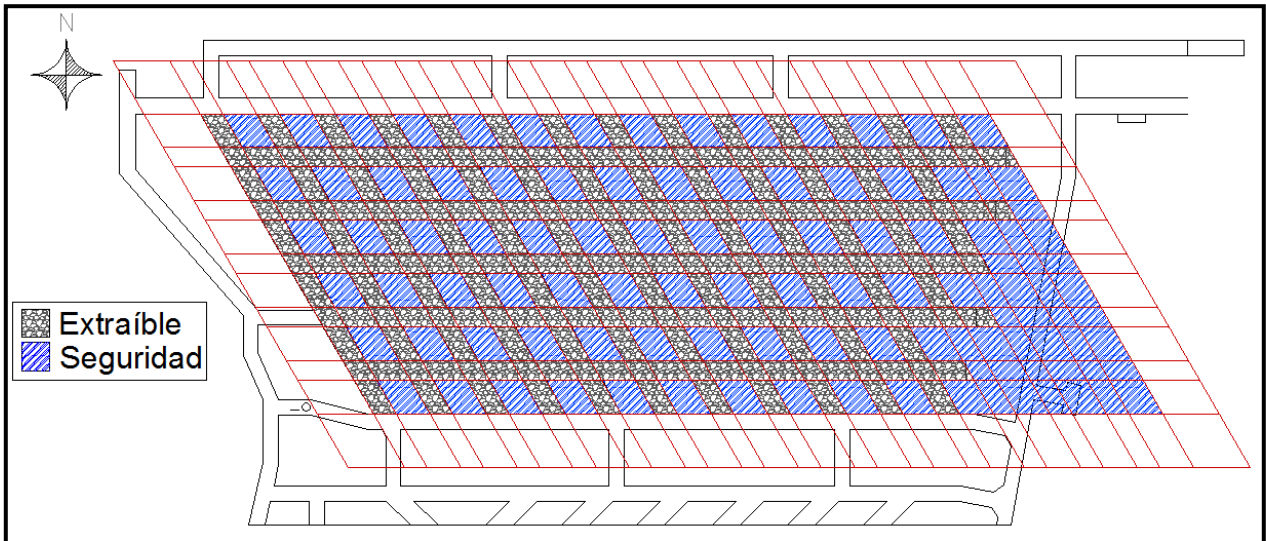


Figura 10: Layout interno de extracción 15E.

También se rellenan en la matriz los componentes asociados a las cotas de la unidad, desde donde es posible acceder para la explotación del mineral y desde donde nunca se podrá acceder. Se asocia al valor 1 la posibilidad de ingresar al panel por alguno de los accesos predefinidos por proyecto y como 0 a los sectores desde los que no es posible acceder. En la figura que sigue se puede apreciar en color verde los accesos determinados para la unidad a extraer y en color rojo al borde desde donde no es posible ingresar al yacimiento para realizar faenas de explotación.

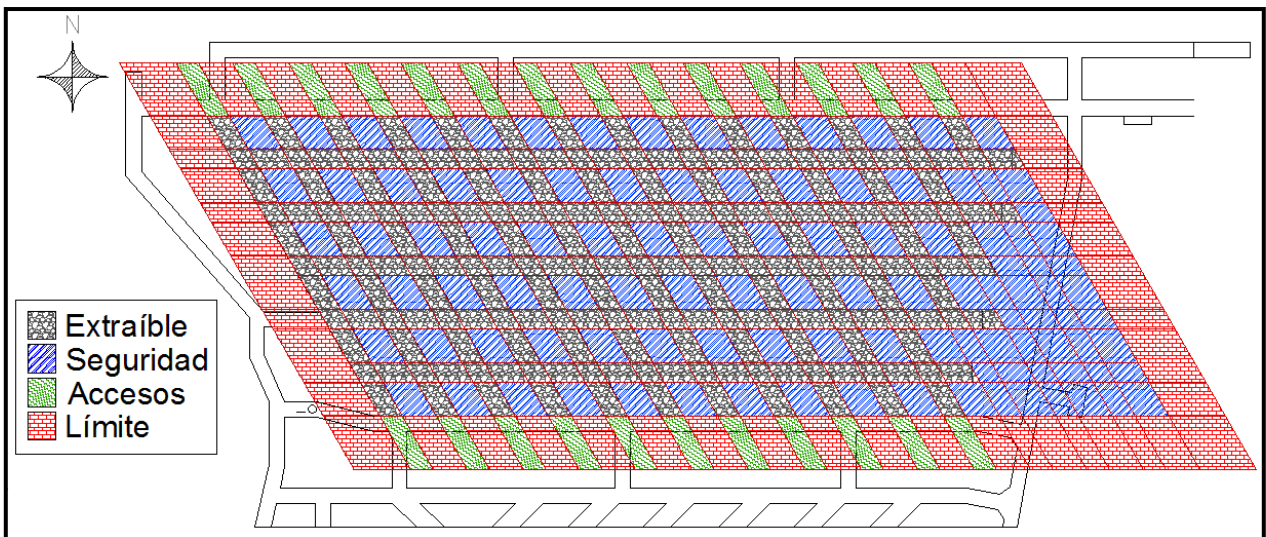


Figura 11: Layout de extracción interno y accesos 15E.

Teniendo desarrollado el esquema base sobre el cual se trabajará, se desea definir variables de decisión para cada uno de los estados temporales del layout. Se contemplan para esta aproximación las siguientes:

- Variable que defina a qué punto ir desde un punto actual.
- Variable que registre la cantidad de material extraído.

- Variable que registre los bloques a rellenar una vez alcanzada la máxima área abierta posible.
- Variable de control que determine el material remanente en cada bloque.
- Parámetro de distancias desde bloques extraíbles a los accesos.

Esta forma de abordar el problema analizaría, al menos, 400 variables por cada periodo sólo para la decisión de ir de un punto a otro, y en donde los periodos se definieron como los turnos diarios de operadores que trabajan en la mina.

Una de las principales complicaciones de esta idea para abordar el problema radica en la forma de establecer la secuencia de extracción, junto con la cantidad de variables de estado (matrices de estado). Además, no se logró desarrollar una forma clara para establecer el flujo de los equipos de un lugar a otro ni del material remanente.

▪ **Segunda aproximación**

Buscando solucionar el problema de tener la secuencia de extracción del equipo de excavación continua, se orientó el trabajo hacia el análisis por medio de nodos y flujo en redes.

Desde dicha perspectiva, inmediatamente se obtiene una forma directa de saber el movimiento de los equipos desde un nodo a otro, considerando cuanto material remanente existe al inicio de cada periodo y cuando se extrae finalmente.

La representación gráfica del sistema ideado es la que se puede apreciar en la siguiente figura:

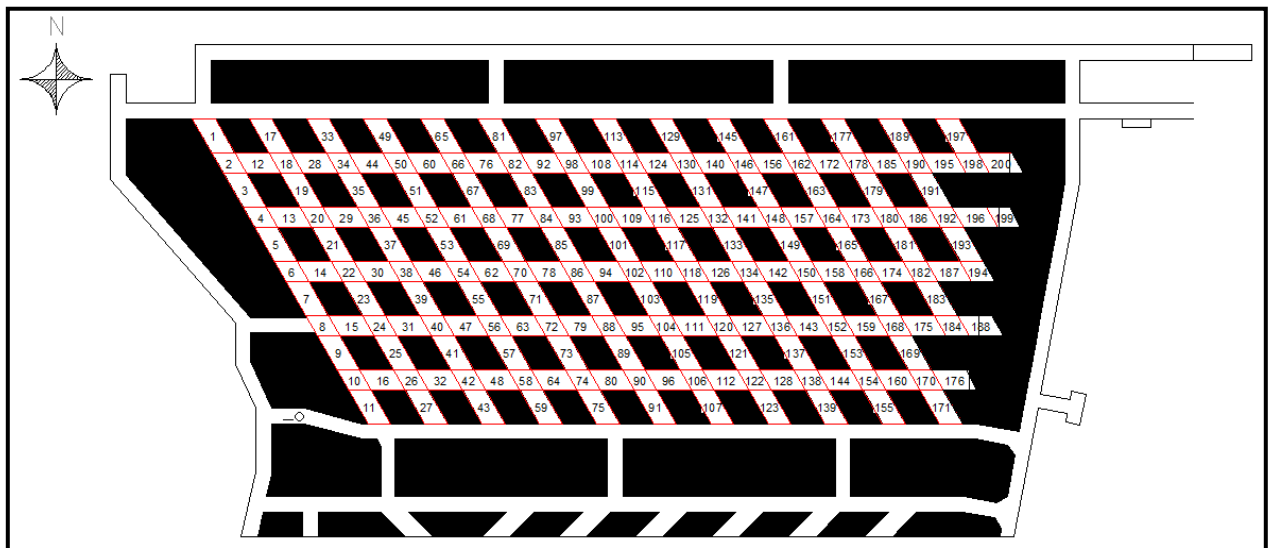


Figura 12: Representación nodos de discretización 15E.

Para el modelo expuesto, se buscó tener una matriz con las transiciones mínimas posibles. Considerando que para la unidad 15E son 200 puntos a ser extraídos y que cada uno de ellos tiene al menos 1 conexión y como máximo 4 si es que no es un punto de acceso al layout, entonces es posible entender que la cantidad de variables que

se almacenarían en la matriz de transición sería de gran tamaño para cada uno de los periodos de tiempo.

Bajo esta mirada, las variables involucradas decidirían cuanto material extraer de cada nodo en la unidad cronológica definida y en que otros nodos se extraerían en los periodos siguientes. Las variables del problema correspondían a las siguientes:

- Variable de decisión que determine la cantidad de material a extraer de cada nodo en cada etapa de la secuencia.
- Variable de decisión que determine nodos a ser rellenados una vez alcanzada el área máxima abierta.
- Variable de control que bloquee rutas entre nodos una vez que ha sido rellenado uno.
- Parámetros de transición de un nodo a otro de la malla.
- Parámetro de conexiones factibles desde el nodo actual en la secuencia.

Problemas de abordar el modelamiento bajo esta óptica, consisten en la gran cantidad de datos para cada uno de los arcos necesarios para ir de un punto a otro, lo que se traduce en una gran cantidad de trabajo previo en cuanto al desarrollo de inputs no existentes para el modelo.

Ideando alternativas más sencillas de modelar y con menos variables por cada etapa, es que se llega a la siguiente aproximación de diseño para el modelamiento posterior.

▪ **Tercera aproximación**

Este acercamiento metodológico para el modelamiento del layout y el de la extracción posterior, tiene relación con establecer como variables de control las intersecciones entre drifts y cruzados, junto con las intersecciones de caminos de acceso y drifts para el ingreso a la unidad.

Se detallan un total de 92 nodos (para la unidad 15E) que pueden ser origen o destino en cada una de las etapas de la secuencia de explotación.

La idea subyacente es determinar desde que nodo parte y hacia que nodo se mueve el equipo de excavación continua en cada instante de la secuencia ($s=\{1,2,\dots,\tau\}$).

Se asume que en cada traslado el equipo emplea un tiempo fijo determinado por la velocidad de traslado sin producir y, si es la primera vez que pasa por el arco que une los nodos se adiciona un tiempo variable determinado por el diferencial entre el tiempo de desplazamiento y el de extracción empleado por la máquina en cada metro de avance.

En las figuras que siguen se pueden apreciar la distribución de los nodos en el layout de proyecto de la unidad, junto con los tramos de extracción discretizados por los segmentos que acotan en la unidad cada uno de los puntos.

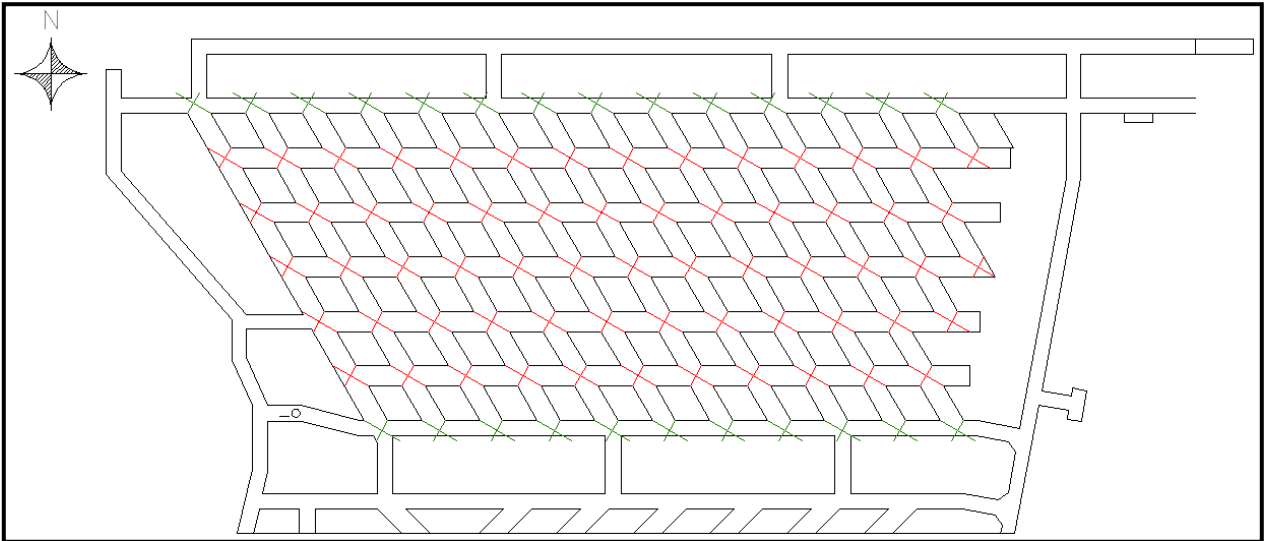


Figura 13: Layout 15E nodos intersecciones.

Es posible determinar la cantidad de material existente en cada uno de los tramos estableciendo el área de cada hexágono en el layout, tal como se muestra en la siguiente figura, donde las cruces de los nodos de inicio y llegada acotan tramos (en color azul):

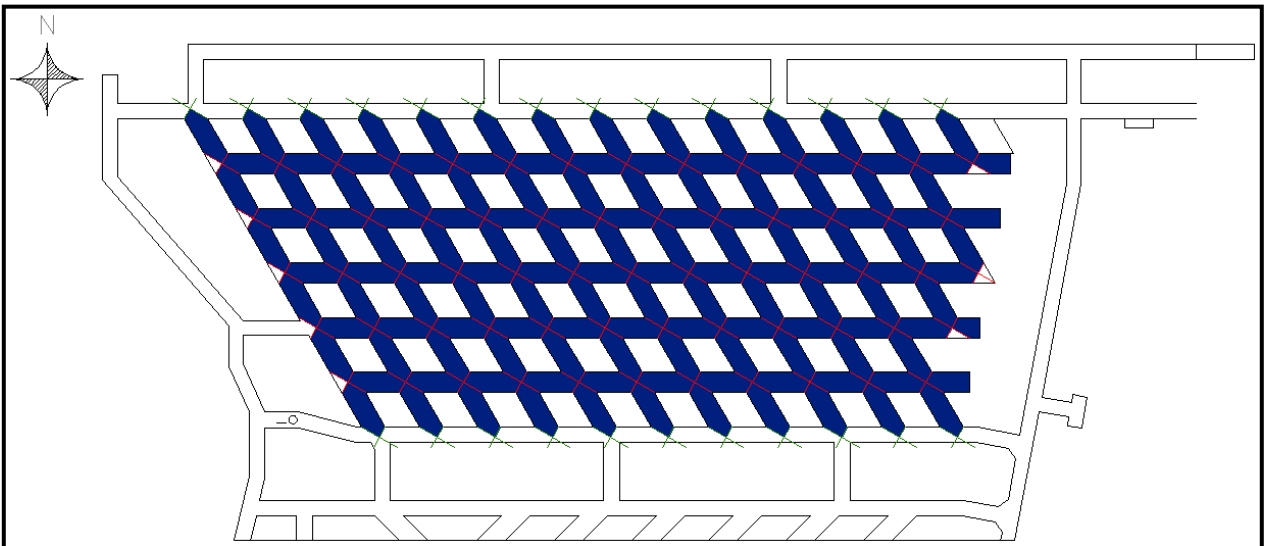


Figura 14: Layout 15E tramos entre nodos intersecciones.

Se procedió a numerar cada uno de los nodos para establecer los arcos factibles por proyecto de origen-destino, junto con los tiempos de transición involucrados dependiendo de si se está o no extrayendo material. Junto con lo anterior, se confeccionó la matriz de transición desde un nodo origen a otro destino, con las posibilidades existentes para cada uno de los nodos contemplados.

En la figura que sigue se identifica la numeración asignada a cada uno de los nodos de intersección definidos para la unidad 15E.

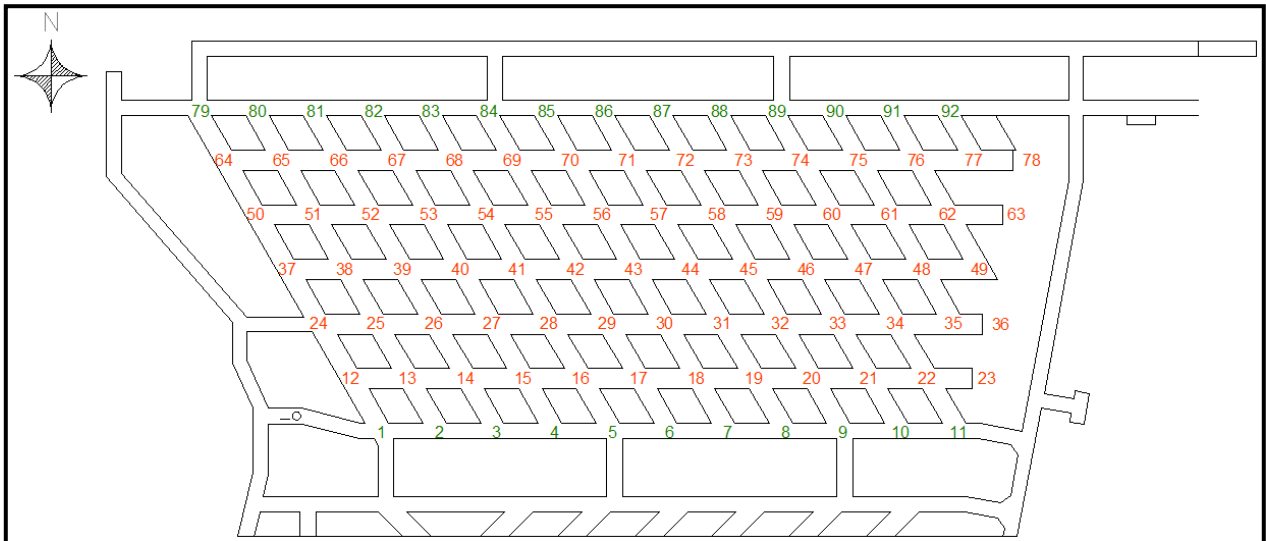


Figura 15: Layout 15E numeración nodos intersección.

Posteriormente se definieron las variables de decisión asociadas al problema, que determinan si se va desde un punto inicial i a uno de destino j en el instante s de la secuencia, registrándose el tiempo empleado en dicha transición y obligando al modelo a extraer los tramos completos en pos de simplificar el problema.

Complicaciones de esta aproximación se relacionan con la forma de determinar las distancias mínimas entre cada uno de los nodos, los que deben estar definidos a priori. Dicho problema es equivalente en magnitud a establecer todas las n -tuplas factibles de puntos necesarios a recorrer para ir de un origen a un destino.

▪ **Cuarta aproximación**

Un aspecto que no se ha abordado por medio del diseño anterior, en lo que respecta a la decisión y condiciones para rellenar, es el que corresponde al volumen máximo posible de extraer por condiciones de estabilidad. Este valor se define para cada unidad extractiva por parte de los geomecánicos y para la unidad en estudio corresponde al área interior comprendida entre 4 drifts que crucen por completo la unidad (según la vista en planta).

Es así como se modela el problema partiendo de esta limitante de la operación, estableciendo como unidad de análisis un área correspondiente a la mitad del área máxima que se puede extraer. Se llamará módulo o sub-panel a esta unidad de análisis.

Puede apreciarse en la siguiente imagen, el área correspondiente al sub-panel. En ella se contempla un área máxima extraída al final de la secuencia de extracción y que corresponde al color azul con relleno de grava. En color rojo y achurado, se representan los pilares internos de seguridad dentro del sub-panel de 4 drifts por 4 calles de cruzados:

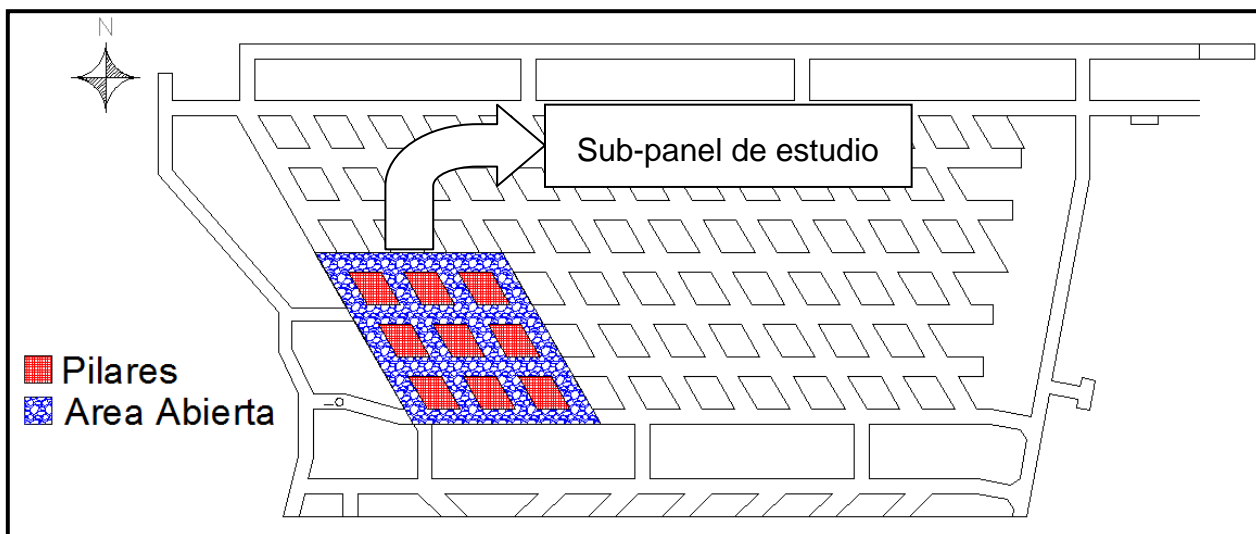


Figura 16: Módulo de análisis en unidad 15E.

Buscando simplificar el modelamiento, se aborda la extracción limitada a la máxima cantidad de drifts y cruzados que se pueden abrir sin que se comprometa la estabilidad de la unidad de extracción. Lo anterior se sustenta en la conveniencia operacional de ajustar las decisiones de extracción a lo que es factible de excavar sin comprometer a futuro la unidad extractiva y a la posibilidad cierta de rellenar el módulo antes de comenzar a excavar en otro sector de la unidad, puesto que la velocidad en la que se puede realizar el relleno de los frentes es mayor a la velocidad de excavación de los equipos de extracción.

Se discretiza así un panel de tamaño menor al de una unidad de explotación del yacimiento subterráneo, el cual se encuentra acotado a un área cercana a los 4.500 [m²] y que corresponde al área encerrada por 4 drifts y 4 calles de cruzados, ajustándose a la mitad del valor de área abierta máxima para la unidad en estudio que es cercano a los 3000 [m²] (viéndolo en planta) al descontar el área correspondiente a los pilares interiores y numerándolo según sigue:

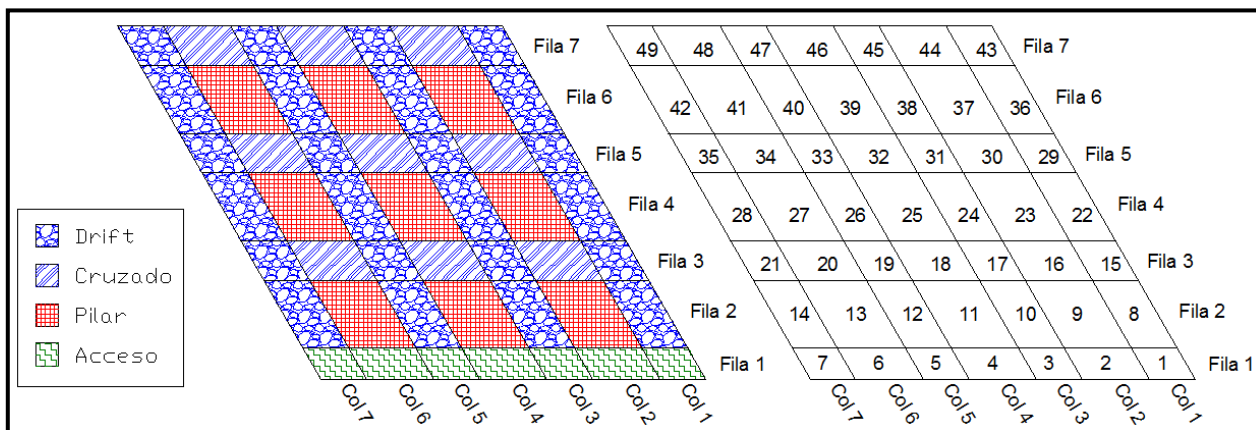


Figura 17: Discretización del módulo de análisis.

La descripción anterior supone una condición del terreno favorable a la extracción, en donde es posible excavar cada uno de los bloques correspondientes a drifts y cruzados en su totalidad antes de comenzar a extraer otro bloque dentro del sub-panel.

Bajo este enfoque, existe una única variable de decisión que corresponde a definir el bloque a excavar para cada etapa de la secuencia de extracción. Esta última se encuentra acotada a la cantidad de bloques que son factibles de extraer dentro del sub-panel. Además, se definen 2 variables de estado para identificar por un lado la transición de ir desde un bloque a otro en etapas consecutivas y el estado de cada bloque para cada etapa de la secuencia (si se encuentra excavado o no).

Si se desea incorporar un análisis más sensible de la variabilidad entre terrenos en cuanto a si es favorable o desfavorable a la extracción, es decir, si son necesarias las fortificaciones cada menos metros de avance para poder seguir extrayendo en determinado drift o cruzado, un ajuste sencillo de efectuar corresponde a detallar aún más la grilla del sub-panel. Con esto, se logra identificar en el modelo que serán necesarios más traslados para poder excavar completamente el área contemplada como mineral extraíble, dado que cada vez que se realice un proceso de excavación será necesario realizar la fortificación de dicho avance en los periodos siguientes.

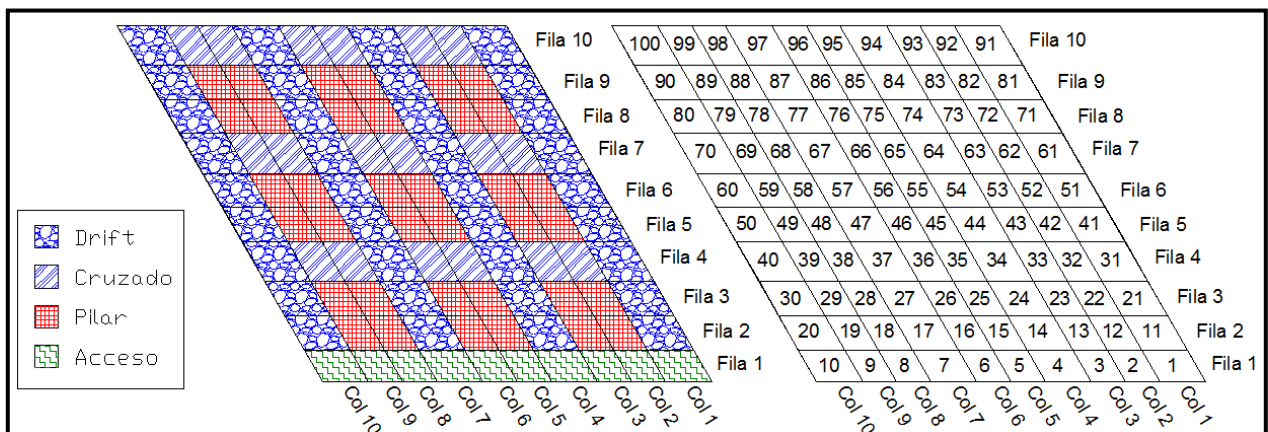


Figura 18: Discretización más fina del módulo de análisis.

Independiente del nivel de la discretización que se efectúe, se asume que la fortificación se realiza en el periodo siguiente y subsiguiente de la secuencia en los bloques correspondientes a un drift y sólo en el periodo siguiente para los cruzados, dado que estos últimos requieren menor tiempo en los procesos y a que muchos de los cruzados no vuelven a ser transitados por el equipo, a diferencia de lo que ocurre en los drifts.

Los sub-paneles son extraídos completamente por el roadheader para luego abordar el siguiente sub-panel al interior de la unidad de extracción, encontrándose éste paralelo al anterior ya sea al este o al oeste. Lo anterior se encuentra condicionado por la extensión máxima del cable que alimenta de energía al equipo roadheader, el cual se conecta a la sub-estación próxima a la calle de accesos, con lo cual el punto de acceso más cercano para cada drift del sub-panel extraído se encontrará en la misma calle de accesos que los correspondientes al sub-panel siguiente. Así, los sub-paneles que se

extraigan no serán necesarios para acceder a los sub-paneles que se programen posteriormente para el roadheader (transitar por su interior) por lo que pueden ser rellenados para garantizar la estabilidad de la unidad de extracción sin comprometer la excavación de otros sub-paneles.

6.5. Resultados esperados

Del desarrollo expuesto se espera tener una secuencia de extracción factible para al menos uno de los equipos de excavación continua, definiendo las transiciones que minimicen las distancias de traslado del equipo desde un punto de excavación al siguiente.

Se desea obtener una mejora con respecto al escenario actual de programación de la extracción en cuanto a la distancia recorrida por el equipo de excavación.

Además, se busca que el modelo arroje resultados en un tiempo computacionalmente adecuado dependiendo de si se espera proyectar acciones para el mediano o el corto plazo.

7. FORMULACIÓN DEL MODELO

La metodología para formular el modelo parte de una identificación básica del proceso productivo descrito en los capítulos anteriores, realizando simplificaciones y supuestos sobre el mismo.

Posteriormente, se lleva a lenguaje matemático la descripción desarrollada en el marco metodológico incorporando las simplificaciones y los supuestos necesarios.

Es así cómo se refleja la expresión más sencilla posible del proceso de extracción en la mina subterránea (sin perder la representatividad del proceso extractivo) dentro de lo que corresponde al análisis de cómo minimizar los traslados que efectúa el equipo para excavar en cada uno de los bloques numerados para las calles de producción del panel en estudio.

7.1. Planteamiento del problema y supuestos

Luego de un análisis extenso de las alternativas generadas para modelar el problema, se identifican las siguientes condiciones relevantes para su desarrollo y posterior implementación:

- Se evalúa la extracción de un sub-panel numerado como se señaló en la cuarta aproximación del capítulo 6.4.2.
- Variaciones del modelamiento de la cuarta aproximación, perdiendo la forma regular del sub-panel, corresponden a añadir cruzados adicionales en los extremos, añadir calles de producción o disminuir las calles ajustándose a los sectores remanentes de la unidad en estudio.
- El área de excavación dentro del diseño en planta de la unidad, equivale a un tonelaje específico a ser extraído por completo por un solo roadheader al final de los periodos de evaluación.
- Los periodos de evaluación establecen un orden secuencial y no tienen relación con una magnitud de tiempo físico.

- Son definidos bloques de un área determinada en el diseño en planta, con una cantidad de toneladas de material a ser extraído asociado al área del bloque.
- La extensión de los bloques, en el sentido de la calle de producción donde se encuentran, no sobrepasará el avance máximo de 17 [m].
- El avance lineal en cada una de las calles de producción, cuando la máquina está extrayendo mineral, corresponde a un tonelaje extraído fijo por cada metro de avance.
- La decisión de extraer en alguna de las calles de producción es discreta.
- La extracción de cada bloque implica incurrir en un tiempo de extracción, asociado a la velocidad de avance de la máquina en el terreno (al rendimiento real medido del equipo).
- La condición del terreno en cada calle de producción condiciona el avance efectivo y determina el nivel de discretización necesario (nivel de detalle).
- Se fortifica cada bloque extraído en el período, al interior del sub-panel, con una holgura máxima de 2 períodos siguientes de la secuencia de extracción en los bloques asociados a drifts y uno para los cruzados. Esto condiciona el acceso a los bloques posteriores en los drifts a 3 períodos posteriores.
- La decisión de extracción en un bloque en el periodo actual restringe la decisión de extracción sobre algunos bloques en el periodo siguiente y subsiguiente. Es decir, extracción obliga a la fortificación.
- Los accesos se asumen como extraídos en la etapa inicial. Se pueden añadir otros bloques como extraídos para representar el estado actual del sub-panel y como proceder en adelante desde un punto actual de extracción (incorporando la historia).
- Los cruzados se extraen en orden inverso al sentido de apertura de los drifts. Si el punto de acceso se encuentra al sur, entonces los bloques en los drifts se abren en orden desde el más al sur hacia el norte y los cruzados adyacentes al oeste de dicho drift se abren en orden desde el más al norte hasta el más al sur. Lo anterior obedece a un criterio de avanzar lo máximo posible en un drift para no perder los cruzados más distantes a los accesos por colapsos que puedan suceder al tenerse mucho volumen abierto por causa de la extracción. Esto se relaja en un modelamiento posterior dado que no existen riesgos de colapso al interior del sub-panel en el análisis a priori.
- El sub-panel se orienta desde los accesos de la unidad hacia el interior, sin sobrepasar la calle de cruzados que se encuentra al medio de la unidad.
- Como forma de acercamiento, se utiliza la distancia euclidiana entre bloques en vez de la distancia mínima real entre bloques (la que puede obtenerse por medio de algoritmos de ruta mínima como Dijkstra y/o Bellman-Ford entre otros). Se pretende analizar los resultados que se obtienen y la secuencia que arroja esta aproximación contra la medición de la distancia mínima real de traslado.

- Cada bloque del panel posee solo un punto de acceso directo desde el cual es posible ingresar, el cual está dado por la ubicación del sub-panel al interior de la unidad y la calle de accesos más próxima. A los drifts se accederá por el punto de acceso más cercano y a los cruzados por el drift adyacente con ángulo favorable para la maniobra de giro.
- La distancia de un bloque de seguridad (no extraíble) a un punto de acceso se define como infinito, pero para efectos de resolución del modelo se empleará un valor suficientemente grande que identifique como infactible ir desde el acceso a dicho bloque.
- En el modelo definitivo, se emplea la distancia operacional de traslado de un bloque a otro (única viable en la operación). Si se tiene 2 bloques b1 y b2 con sus respectivos accesos al panel a1 y a2, la distancia operacional se define como

$$d(b1,b2) = d(b1,a1) + d(a1,a2) + d(a2,b2)$$

El esquema expuesto en la siguiente figura establece de forma gráfica la distancia operacional que limita el movimiento de los equipos al interior del sub-panel:

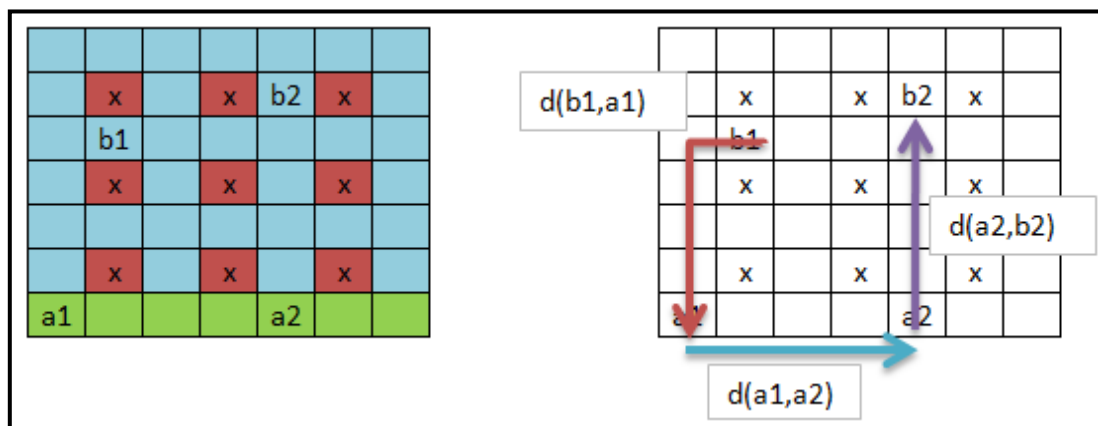


Figura 19: Esquema de distancia operacional.

7.2. Modelo de programación matemática

El modelo de programación matemática que resuelve el problema del secuenciamiento del equipo de excavación dentro de cada sub-panel es el que se expone a continuación.

MODELO MINA SUBTERRÁNEA

Conjuntos

- $b \in B$: Bloques pertenecientes a la zona de análisis.
- $p \in P$: Bloques no extraíbles, por diseño de seguridad, en la zona de análisis.
- $e \in E$: Bloques con mineral a ser extraídos en la zona de análisis.
- $a \in A$: Bloques de acceso a la zona de análisis.
- $s \in S$: Etapas de la secuencia de explotación.

$f1 \in F1$:	Bloques pertenecientes a la fila 1 (cruzados e intersecciones)
$f2 \in F2$:	Bloques pertenecientes a la fila 2 (cruzados e intersecciones)
$f3 \in F3$:	Bloques pertenecientes a la fila 3 (cruzados e intersecciones)
$f4 \in F4$:	Bloques pertenecientes a la fila 4 (cruzados e intersecciones)
$c1 \in C1$:	Bloques pertenecientes a la columna 1 (drift)
$c2 \in C2$:	Bloques pertenecientes a la columna 2 (drift)
$c3 \in C3$:	Bloques pertenecientes a la columna 3 (drift)
$c4 \in C4$:	Bloques pertenecientes a la columna 4 (drift)
$cc12 \in CC12$:	Bloques pertenecientes a cruzados entre columnas 1 y 2
$cc23 \in CC23$:	Bloques pertenecientes a cruzados entre columnas 2 y 3
$cc34 \in CC34$:	Bloques pertenecientes a cruzados entre columnas 3 y 4
$xc \in XC$:	Bloques definidos como cruzados de producción.
$ixc \in IXC$:	Bloques adyacentes y precedentes a un cruzado de producción.
$dxs \in DXC$:	Bloques adyacentes y posteriores a un cruzado de producción.

Parámetros

$de_{b1,b2}$: Distancia asociada a ir desde el bloque $b1$ hasta el bloque $b2$

Variables de decisión

X_b^s : Decisión de extracción de bloque b durante la etapa s de la secuencia de extracción.

$$X_b^s = \begin{cases} 1 & \text{si el bloque } b \text{ es extraído durante } s \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Variables de estado

EX_b^s : Estado del bloque b al inicio de la etapa s .

$$EX_b^s = \begin{cases} 1 & \text{si el bloque } b \text{ está extraído al inicio de la etapa } s \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$TR_{b1,b2}^s$: Control sobre el traslado del equipo desde bloque $b1$ a $b2$ entre $s - 1$ y s .

$$TR_{b1,b2}^s = \begin{cases} 1 & \text{si } (X_{b1}^{s-1} = 1) \wedge (X_{b2}^s = 1) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Restricciones

- R1) Naturaleza de las variables.

$$\begin{aligned} X_b^s &\in \{0, 1\} & \forall s \in S, \forall b \in B \\ EX_b^s &\in \{0, 1\} & \forall s \in S, \forall b \in B \\ TR_{b1, b2}^s &\in \{0, 1\} & \forall s \in S, \forall b1 \in B, \forall b2 \in B \end{aligned}$$

➤ Condiciones de Borde

- R2) No se deben extraer aquellos bloques asociados a pilares de seguridad durante toda la secuencia de explotación.

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} X_p^s = 0$$

- R3) No se deben extraer aquellos bloques asociados a los accesos durante toda la secuencia de explotación.

$$\sum_{s \in S} \sum_{a \in A} X_a^s = 0$$

- R4) Condición de borde para los bloques de acceso, asociado al registro de la extracción realizada. Se definen como ya extraídos antes de comenzar la evaluación de la secuencia.

$$EX_a^0 = 1 \quad \forall a \in A \subseteq B$$

- R5) Condición de borde para los bloques explotables, asociado al registro de extracción realizada. Se definen como no extraídos antes de comenzar la evaluación de la secuencia.

$$EX_e^0 = 0 \quad \forall e \in E \subseteq B$$

- R6) Condición de borde para los bloques de seguridad (pilares), asociado al registro de extracción realizada. Se definen como no extraídos antes de comenzar la evaluación de la secuencia.

$$EX_p^0 = 0 \quad \forall p \in P \subseteq B$$

- R7) Condición de borde para la decisión de extracción de cada bloque antes de evaluar la secuencia. Se impone la decisión de extracción antes de comenzar la evaluación de la secuencia.

$$X_b^0 = 0 \quad \forall b \in B$$

➤ Limitantes para la extracción

- R8) Transición de estado para cada bloque entre etapas consecutivas de la secuencia de extracción. Establece el criterio recursivo bajo el cual un bloque se encuentra o no extraído.

$$EX_b^s = EX_b^{s-1} + X_b^{s-1} \quad \forall s \in S, \forall b \in B$$

- R9) Extraer solamente bloques que se encuentren sin ser extraídos en la etapa actual.

$$X_b^s \leq (1 - EX_b^s) \quad \forall s \in S, \forall b \in B$$

- R10) Extraer sólo un bloque, de aquellos extraíbles, durante cada etapa de la secuencia de explotación.

$$\sum_{e \in E} X_e^s = 1 \quad \forall s \in S$$

- R11) Extraer una sola vez cada bloque, de aquellos extraíbles, durante toda la secuencia de explotación.

$$\sum_{s \in S} X_e^s = 1 \quad \forall e \in E \subseteq B$$

➤ Extracción de bloques accesibles desde un volumen abierto

- R12) Criterio de extracción de bloques en drift 1, determinado por la precedencia física de extracción de los bloques, dado el layout de diseño y los accesos.

$$EX_{b_1}^s \geq EX_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 < b_2, \\ b_1 \in C_1 \subseteq B, b_2 \in C_1 \subseteq B$$

- R13) Criterio de extracción de bloques en drift 2, determinado por la precedencia física de extracción de los bloques, dado el layout de diseño y los accesos.

$$EX_{b_1}^s \geq EX_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 < b_2, \\ b_1 \in C_2 \subseteq B, b_2 \in C_2 \subseteq B$$

- R14) Criterio de extracción de bloques en drift 3, determinado por la precedencia física de extracción de los bloques, dado el layout de diseño y los accesos.

$$EX_{b_1}^s \geq EX_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 < b_2, \\ b_1 \in C_3 \subseteq B, b_2 \in C_3 \subseteq B$$

- R15) Criterio de extracción de bloques en drift 4, determinado por la precedencia física de extracción de los bloques, dado el layout de diseño y los accesos.

$$EX_{b_1}^s \geq EX_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 < b_2, \\ b_1 \in C4 \subseteq B, b_2 \in C4 \subseteq B$$

- R16) Criterio de extracción de cruzados, determinado por la precedencia física y la apertura previa de los segmentos de drifts adyacentes y precedentes.

$$EX_{b_{1-1}}^s \geq EX_{b_1}^s \quad \forall s \in S, b_1 \in XC \subseteq B$$

- R17) Criterio de extracción de cruzados en columna entre drift 1 y 2 (desde drifts adyacente y en sentido inverso al del ingreso al drift).

$$EX_{b_1}^s \leq EX_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 < b_2, \\ b_1 \in CC12 \subseteq B, b_2 \in CC12 \subseteq B$$

- R18) Criterio de extracción de cruzados en columna entre drift 2 y 3 (desde drifts adyacente y en sentido inverso al del ingreso al drift).

$$EX_{b_1}^s \leq EX_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 < b_2, \\ b_1 \in CC23 \subseteq B, b_2 \in CC23 \subseteq B$$

- R19) Criterio de extracción de cruzados en columna entre drift 3 y 4 (desde drifts adyacente y en sentido inverso al del ingreso al drift).

$$EX_{b_1}^s \leq EX_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 < b_2, \\ b_1 \in CC34 \subseteq B, b_2 \in CC34 \subseteq B$$

➤ Fortificación de los bloques extraídos

- R20) Condición de fortificación en periodos siguientes dada la decisión de extracción actual (en cruzados).

$$X_{b_1}^{s+1} \leq (1 - X_{b_{1-1}}^s) \quad \forall s \in S, b_1 \in XC \subseteq B$$

- R21) Condición de fortificación en periodo siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 1).

$$X_{b_2}^{s+1} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C1 \subseteq B, b_2 \in C1 \subseteq B$$

- R22) Condición de fortificación en periodo sub-siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 1).

$$X_{b_2}^{s+2} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C1 \subseteq B, b_2 \in C1 \subseteq B$$

- R23) Condición de fortificación en periodo siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 2).

$$X_{b_2}^{s+1} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C_2 \subseteq B, b_2 \in C_2 \subseteq B$$

- R24) Condición de fortificación en periodo sub-siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 2).

$$X_{b_2}^{s+2} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C_2 \subseteq B, b_2 \in C_2 \subseteq B$$

- R25) Condición de fortificación en periodo siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 3).

$$X_{b_2}^{s+1} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C_3 \subseteq B, b_2 \in C_3 \subseteq B$$

- R26) Condición de fortificación en periodo sub-siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 3).

$$X_{b_2}^{s+2} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C_3 \subseteq B, b_2 \in C_3 \subseteq B$$

- R27) Condición de fortificación en periodo siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 4).

$$X_{b_2}^{s+1} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C_4 \subseteq B, b_2 \in C_4 \subseteq B$$

- R28) Condición de fortificación en periodo sub-siguiente dada la decisión de extracción actual (drift 4).

$$X_{b_2}^{s+2} \leq (1 - X_{b_1}^s) \quad \forall s \in S, \forall b_2 > b_1, \\ b_1 \in C_4 \subseteq B, b_2 \in C_4 \subseteq B$$

➤ Cotas para la variable de traslados

- R29) Restricción 1 sobre variable de control de traslado entre bloques desde la etapa anterior a la actual.

$$TR_{b_1, b_2}^s \leq X_{b_2}^s \quad \forall s \in S, \forall b_1 \in B, \forall b_2 \in B$$

- R30) Restricción 2 sobre variable de control de traslado entre bloques desde la etapa anterior a la actual.

$$TR_{b_1, b_2}^s \leq X_{b_1}^{s-1} \quad \forall s \in S, \forall b_1 \in B, \forall b_2 \in B$$

- R31) Restricción 3 sobre variable de control de traslado entre bloques desde la etapa anterior a la actual.

$$TR_{b1,b2}^s \geq X_{b1}^{s-1} + X_{b2}^s - 1,5 \quad \forall s \in S, \forall b1 \in B, \forall b2 \in B$$

Función objetivo

$$\min(z)$$

$$z = \sum_s \sum_{b1} \sum_{b2} (TR_{b1,b2}^s * de_{b1,b2})$$

Del modelo expuesto se obtiene una secuencia de extracción de los bloques pertenecientes al sub-panel, ordenada crecientemente en periodos sucesivos e identificando cual bloque es el que corresponde excavar en cada etapa de dicha secuencia.

7.3. Resolución computacional

Para resolver el modelo expuesto se dispone de un computador con un procesador Intel® Core™ Duo de 1,73 GHz en cada núcleo. La memoria RAM que posee dicho equipo es de 2GB DDR2 a 800 MHz. El sistema operativo bajo el cual se desarrolla la resolución corresponde a Windows 7 Ultimate de 32 bits.

La plataforma utilizada para primero codificar y luego resolver el modelo de programación matemática, como se expuso en capítulos anteriores, corresponde a GAMSIDE (Integrated Development Environment), cuya versión es la *build 18414 / 18495*. Con respecto a la plataforma de resolución GAMS, la versión empleada corresponde a la *build 23.5.1 WIN 18471.18495 VS8 x86/MS Windows* (versión 23.5.1 para Windows 32 bits). El solver empleado en la resolución del modelo es IBM ILOG CPLEX, cuya versión del algoritmo CPLEX es la 12.2.0.0.

El modelo desarrollado en GAMS demora un tiempo cercano a los 20 minutos en resolver el problema descrito, utilizando un computador con las características señaladas. Se corrió el modelo en otro computador con mayor capacidad de procesamiento en cuanto a CPU y memoria RAM², pero el modelo se demora una cantidad similar de tiempo en entregar los resultados. El tiempo empleado es independiente, también, del nivel de refinamiento de la discretización del sub-panel.

Un aspecto que si depende del nivel de refinamiento incurrido en la discretización del sub-panel, es el tamaño del archivo que se crea para resolver el modelo. Este puede pesar desde unos cuantos MB hasta cientos de MB y es un factor a tener en mente a la hora de generar respaldos del proceso.

Al finalizar la evaluación del modelo, es generado un archivo en formato xls, que podrá ser leído y analizado con cualquier programa que interprete planillas de cálculo.

² Procesador Pentium® Dual-Core con 2,70 GHz en cada núcleo, 4 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 7 Professional.

Dicho archivo sirve como input para un pequeño programa desarrollado en Visual Basic dentro de la plataforma Excel, que lee los datos y genera de forma gráfica el plan para el sub-panel.

En una etapa futura, se pretende integrar el mecanismo desarrollado con otros programas empleados en el diseño de la extracción, como software CAD o algunos de modelamiento 3D. Dicha integración queda propuesta para futuro desarrollo y no será abordado en lo que respecta a esta memoria.

7.4. Lectura de datos

Como fue señalado en el punto anterior, el programa genera una matriz de datos de dimensión $n \times m$ en donde se identifica en que parte de la secuencia se pretende extraer cada uno de los bloques que forman parte del diseño de explotación del sub-panel. La matriz identifica que el elemento $a_{n,m}$ tendrá un valor 1 si n corresponde al bloque que debe extraerse en el periodo m . En caso contrario, el valor de $a_{n,m}$ será vacío.

En el esquema siguiente es posible apreciar la forma en que se obtienen los datos del archivo xls generado por GAMS.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI		
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																							
14															1																						
15																1																					
16																	1																				
17																		1																			
18																			1																		
19																				1																	
20																					1																
21																						1															
22																							1														
23																								1													
24																									1												
25																										1											
26																											1										
27																												1									
28																													1								
29																														1							
30																															1						
31																																1					
32																																	1				
33																																		1			
34																																				1	
35																																					

Figura 20: Esquema de output de modelo panel 7x7 en GAMS.

Los valores en las filas corresponden a los bloques bajo análisis de extracción en el modelo y las columnas a los periodos de evaluación del mismo.

Mediante macros programadas en Visual Basic, los datos de la matriz anterior son traducidos a un esquema visual fácil de entender. Dicha traducción obedece solamente a la numeración empleada en cada sub-panel y resulta sencillo de programar nuevas versiones dependiendo de la nueva forma que se desee analizar.

La simplificación empleada en primera instancia corresponde a un sub-panel de 7 filas x 7 columnas, en donde se contemplan 4 drifts, 3 calles de cruzados y una calle de accesos a la unidad.

Bajo la discretización anteriormente expuesta (de 49 bloques en total), se genera una representación visual de la evolución de la secuencia de extracción. En color amarillo y con el símbolo “o” se representa la calle de accesos, con color rojo y el símbolo “x” se representan los bloques que no se deben extraer (pilares en este caso). Los bloques a ser extraídos se numeran según la etapa de la secuencia en la que deben extraerse y poseen una tonalidad del espectro de color entre el celeste y el verde que va ascendiendo desde el celeste para finalizar en el verde.

El esquema del plan generado mediante la macro programada en Excel (utilizando los datos de la figura anterior) se muestra en la siguiente figura:

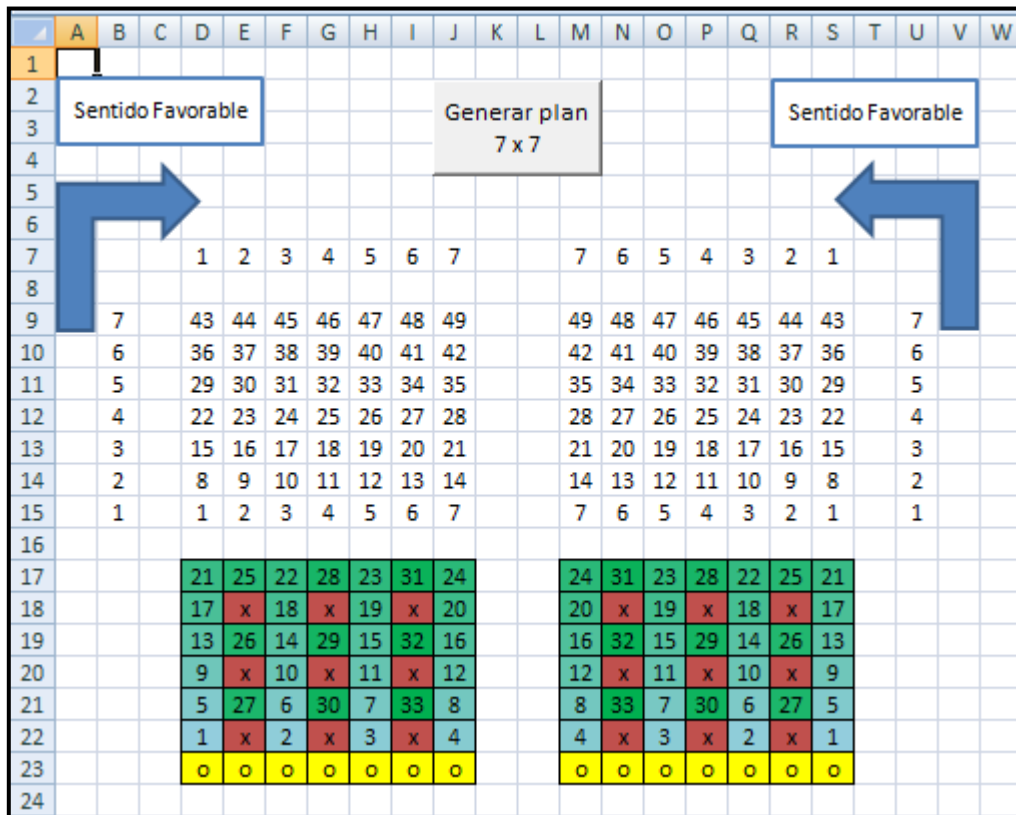


Figura 21: Esquema de generador de planes 7x7.

Se entregan 2 resultados en base al sentido favorable de giro que ofrezca el pilar dentro del sub-panel para el movimiento de la máquina al interior. Esto es de utilidad

para el nuevo diseño que se contempla para la unidad de extracción en base a los planes diseñados de esta manera.

El layout de la unidad modificado en pos de la extracción modular es el que se expone en la figura siguiente:

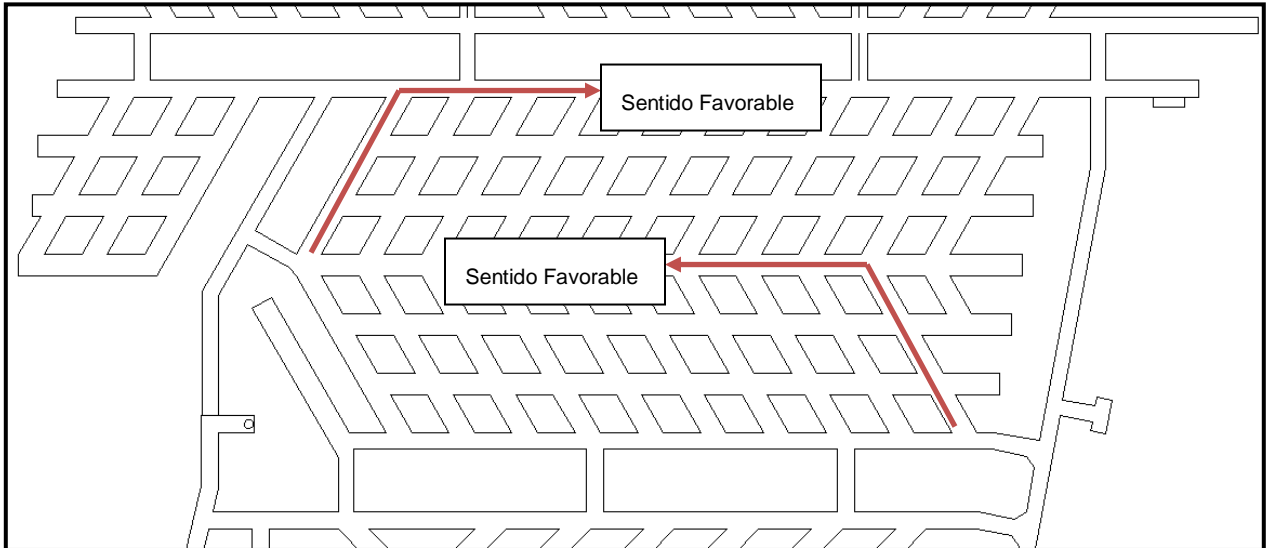


Figura 22: Layout unidad 15E bajo extracción modular de sub-paneles.

7.5. Resultados obtenidos

En una primera aproximación, la distancia empleada fue la euclidiana y luego se empleó la distancia operacional entre puntos analizados dentro del sub-panel.

Los resultados de emplear la distancia euclidiana dan una secuencia posible de ser realizada, pero el valor de la función objetivo dista de ser verosímil.

Para efectos de conocer el tipo de secuencia que se genera con esta aproximación, se detallan algunos resultados obtenidos por modelos que fueron confeccionados sucesivamente, hasta llegar a la versión definitiva:

		Columnas							
		7	6	5	4	3	2	1	
Filas		DR4	DR3	DR2	DR1				
	7	XC3	49	48	47	46	45	44	43
	6		42	41	40	39	38	37	36
	5	XC2	35	34	33	32	31	30	29
	4		28	27	26	25	24	23	22
	3	XC1	21	20	19	18	17	16	15
	2		14	13	12	11	10	9	8
1	ACC	7	6	5	4	3	2	1	

Un cuadro azul con una flecha curva hacia arriba y a la izquierda indica el sentido favorable de extracción.

Figura 23: Esquema numeración de bloques sub-panel 7x7.

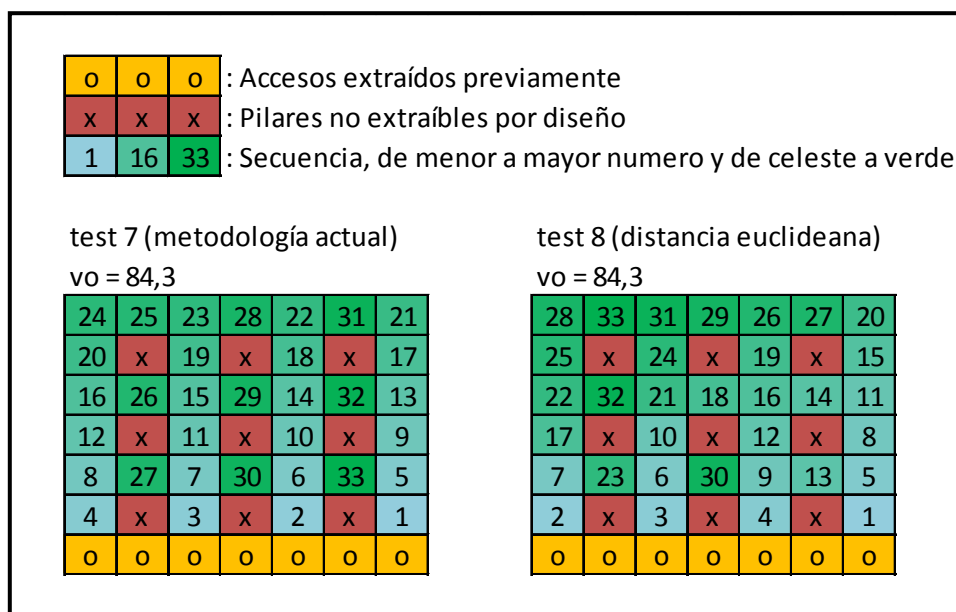


Figura 24: secuencias obtenidas utilizando distancia euclidiana.

Es posible apreciar que el valor de la función objetivo (vo) es el mismo para ambas secuencias. La diferencia entre cada una de las secuencias expuestas radica en que la primera contiene una restricción de fortificación en los cruzados, mientras que el test8 relaja ese criterio. Bajo la distancia euclidiana no es apreciable el impacto de dicha relajación, que operacionalmente es común que ocurra al interior del yacimiento.

Al emplear la distancia de los bloques a los puntos de acceso (que fija una aproximación cercana de los metros existentes entre bloques al ir de uno a otro), se obtienen los siguientes resultados para el sub-panel analizado:

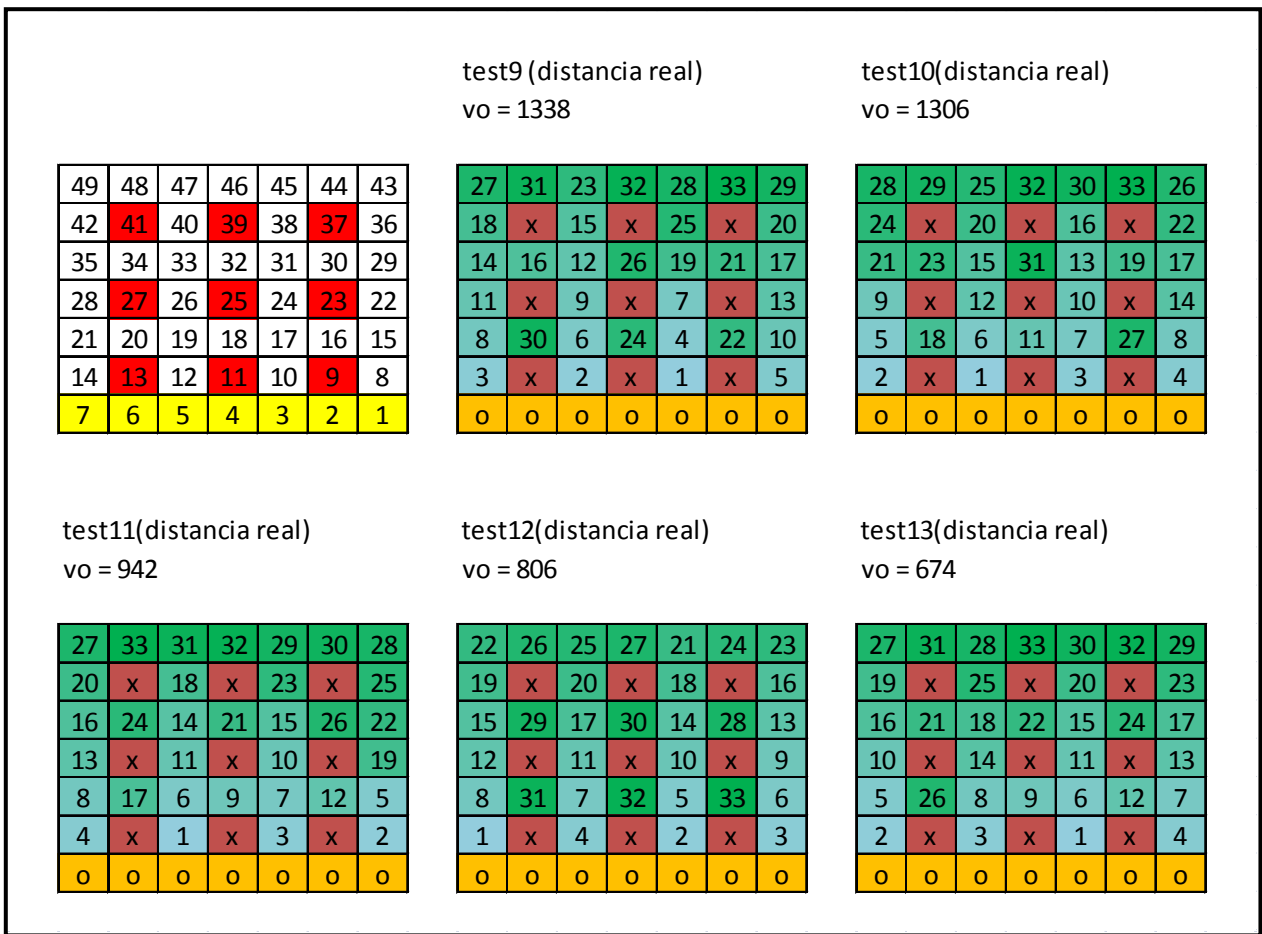


Figura 25: Resultados de programación iterativa del modelo.

Los test 9 y 10 limitan su desempeño en cuanto a los metros recorridos. Lo anterior a causa de las fortificaciones necesarias en drifts y cruzados y por sobredimensionar algunas restricciones operacionales en los bloques pertenecientes a una calle de cruzados (asumir que bloques cruzados paralelos son necesarios de fortificar antes de extraer otro).

La solución entregada por el test 11 refleja la relajación de algunas fortificaciones que operacionalmente no se necesitan bajo la extracción del sub-panel (por ejemplo, fortificar cruzados paralelos antes de extraer un bloque).

La solución 12 relaja la precedencia de extracción de cruzados sólo al bloque adyacente y precedente físicamente. Además, agrega la decisión de realizar la extracción de los cruzados luego de abrir por completo el drift precedente y en sentido inverso del empleado para extraer el drift (para contrastar con la metodología actual).

La solución 13 elimina del modelo la restricción de extraer los cruzados en orden inverso al sentido de extracción drifts, puesto que estructuralmente no deberían ocurrir colapsos del sub-panel extrayendo antes los bloques de cruzados que se encuentran más cercanos a los accesos (por la menor área que contempla abrirse). Con éste resultado, el modelo llega a su versión definitiva y es el mejor resultado entregado por la herramienta bajo la medición de distancia de puntos a los accesos.

La metodología actual de planificación utilizada, establece que deben abrirse 4 drifts por completo en el sub-panel antes de abrir los cruzados existentes. Bajo dicha secuencia de extracción, la distancia recorrida corresponde a 1334 metros de traslado. Comparando el resultado de la extracción en retroceso y el resultado final del modelo, se generan mejoras sustantivas en lo que corresponde a las distancias de traslado del equipo de excavación.

En la siguiente tabla, se aprecia una comparativa de secuencias y distancias asociadas:

Tabla 2: Comparativa entre resultados previos y metodología actual

Metodología actual	test12 (cruzados en retroceso)	test13 (cruzados libres)																																																																																																																																																			
Metros recorridos: 1334[m]	Metros recorridos: 806[m]	Metros recorridos: 674[m]																																																																																																																																																			
Secuencia	Secuencia	Secuencia																																																																																																																																																			
<table border="1"> <tr><td>24</td><td>31</td><td>23</td><td>28</td><td>22</td><td>25</td><td>21</td></tr> <tr><td>20</td><td>x</td><td>19</td><td>x</td><td>18</td><td>x</td><td>17</td></tr> <tr><td>16</td><td>32</td><td>15</td><td>29</td><td>14</td><td>26</td><td>13</td></tr> <tr><td>12</td><td>x</td><td>11</td><td>x</td><td>10</td><td>x</td><td>9</td></tr> <tr><td>8</td><td>33</td><td>7</td><td>30</td><td>6</td><td>27</td><td>5</td></tr> <tr><td>4</td><td>x</td><td>3</td><td>x</td><td>2</td><td>x</td><td>1</td></tr> <tr><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td></tr> </table>	24	31	23	28	22	25	21	20	x	19	x	18	x	17	16	32	15	29	14	26	13	12	x	11	x	10	x	9	8	33	7	30	6	27	5	4	x	3	x	2	x	1	o	o	o	o	o	o	o	<table border="1"> <tr><td>22</td><td>26</td><td>25</td><td>27</td><td>21</td><td>24</td><td>23</td></tr> <tr><td>19</td><td>x</td><td>20</td><td>x</td><td>18</td><td>x</td><td>16</td></tr> <tr><td>15</td><td>29</td><td>17</td><td>30</td><td>14</td><td>28</td><td>13</td></tr> <tr><td>12</td><td>x</td><td>11</td><td>x</td><td>10</td><td>x</td><td>9</td></tr> <tr><td>8</td><td>31</td><td>7</td><td>32</td><td>5</td><td>33</td><td>6</td></tr> <tr><td>1</td><td>x</td><td>4</td><td>x</td><td>2</td><td>x</td><td>3</td></tr> <tr><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td></tr> </table>	22	26	25	27	21	24	23	19	x	20	x	18	x	16	15	29	17	30	14	28	13	12	x	11	x	10	x	9	8	31	7	32	5	33	6	1	x	4	x	2	x	3	o	o	o	o	o	o	o	<table border="1"> <tr><td>27</td><td>31</td><td>28</td><td>33</td><td>30</td><td>32</td><td>29</td></tr> <tr><td>19</td><td>x</td><td>25</td><td>x</td><td>20</td><td>x</td><td>23</td></tr> <tr><td>16</td><td>21</td><td>18</td><td>22</td><td>15</td><td>24</td><td>17</td></tr> <tr><td>10</td><td>x</td><td>14</td><td>x</td><td>11</td><td>x</td><td>13</td></tr> <tr><td>5</td><td>26</td><td>8</td><td>9</td><td>6</td><td>12</td><td>7</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td>3</td><td>x</td><td>1</td><td>x</td><td>4</td></tr> <tr><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td><td>o</td></tr> </table>	27	31	28	33	30	32	29	19	x	25	x	20	x	23	16	21	18	22	15	24	17	10	x	14	x	11	x	13	5	26	8	9	6	12	7	2	x	3	x	1	x	4	o	o	o	o	o	o	o
24	31	23	28	22	25	21																																																																																																																																															
20	x	19	x	18	x	17																																																																																																																																															
16	32	15	29	14	26	13																																																																																																																																															
12	x	11	x	10	x	9																																																																																																																																															
8	33	7	30	6	27	5																																																																																																																																															
4	x	3	x	2	x	1																																																																																																																																															
o	o	o	o	o	o	o																																																																																																																																															
22	26	25	27	21	24	23																																																																																																																																															
19	x	20	x	18	x	16																																																																																																																																															
15	29	17	30	14	28	13																																																																																																																																															
12	x	11	x	10	x	9																																																																																																																																															
8	31	7	32	5	33	6																																																																																																																																															
1	x	4	x	2	x	3																																																																																																																																															
o	o	o	o	o	o	o																																																																																																																																															
27	31	28	33	30	32	29																																																																																																																																															
19	x	25	x	20	x	23																																																																																																																																															
16	21	18	22	15	24	17																																																																																																																																															
10	x	14	x	11	x	13																																																																																																																																															
5	26	8	9	6	12	7																																																																																																																																															
2	x	3	x	1	x	4																																																																																																																																															
o	o	o	o	o	o	o																																																																																																																																															

Es posible apreciar que el modelo con restricción de apertura de cruzados en retroceso (modelado para comparar desempeño del modelo bajo las mismas reglas) presenta un resultado mejor que la metodología actualmente empleada. Utilizando la secuencia del test12, se produciría un ahorro al dejar de recorrer 512[m] y el tiempo que se habría destinado bajo la planificación actual se podría emplear en tareas de extracción para aumentar las toneladas por día de material extraído.

Contrastando la metodología actual con el resultado del test 13, la mejora es prácticamente de la mitad de la distancia (660 [m]) que se deja de recorrer para poder emplear ese tiempo en otros frentes para producir.

Los resultados anteriores no contemplan la distancia recorrida entre puntos de acceso, los cuales se incorporan en la distancia operacional de traslado de equipos.

Al emplear la distancia operacional (que fija una magnitud real de los metros existentes entre bloques al ir de uno a otro), se obtienen los siguientes resultados para el sub-panel analizado:

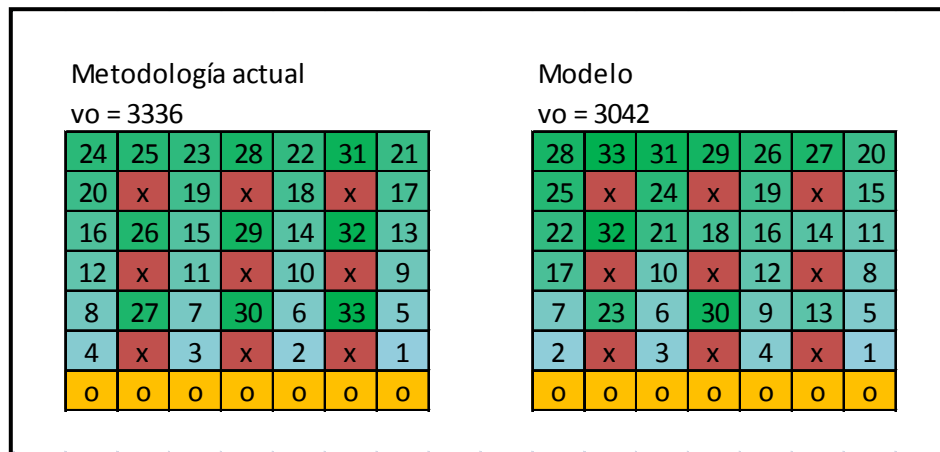


Figura 26: Contraste secuencias modelo y metodología actual.

Contrastando además los rendimientos de los módulos bajo escenarios de extracción diferentes, con la reducción de una calle de producción y algunos cruzados, dada la replicación de módulos que se puede dar en un panel, se observan los siguientes resultados de secuencias:

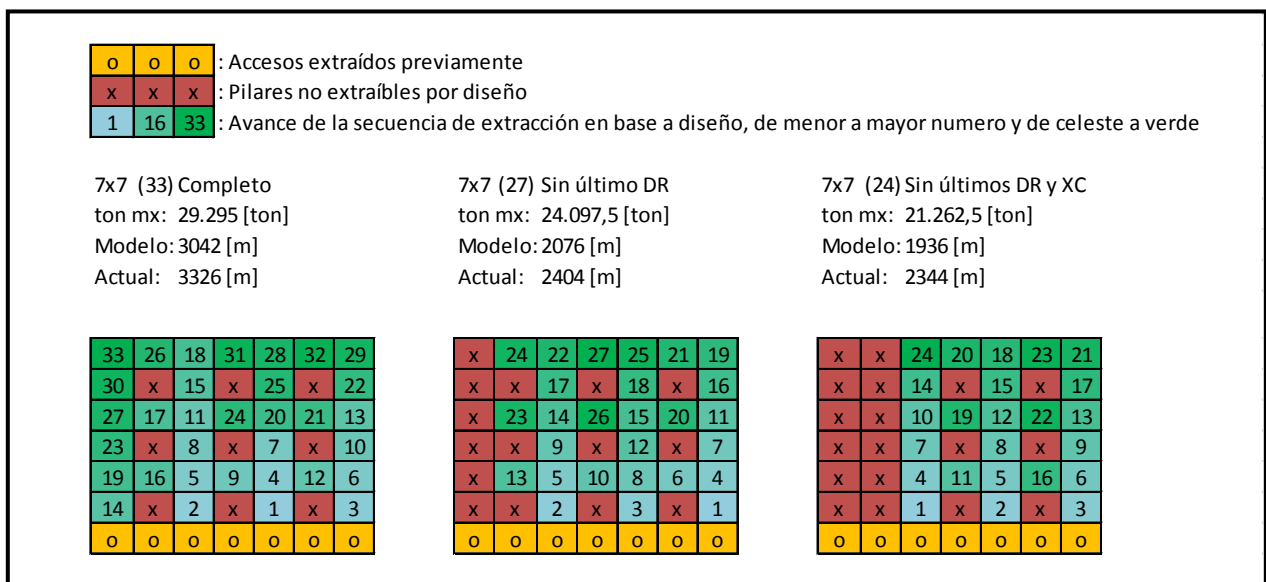


Figura 27: Contraste de secuencias para módulos con distintas formas.

Desde el punto de vista de la productividad y considerando los tiempos de interferencia como un parámetro exógeno pero característico de la producción (en particular de las toneladas de material a extraer), se pueden contrastar los resultados obtenidos en términos de las toneladas diarias extraíbles del sub-panel, empleando los parámetros de extracción, avance y exógeno determinados por la empresa para calcular la mejora gracias al modelo. En las siguientes tablas se aprecia la contribución del modelo en términos de toneladas por día.

Tabla 3: Comparativa de productividad en términos de toneladas por día y hora.

		Panel 7x7 completo			
		Metodología actual		Modelo	
Material en sub-panel	[ton]	29.295,00	[ton]	29.295,00	[ton]
Rendimiento equipo	[m ³ /hr]	40	[m ³ /hr]	40	[m ³ /hr]
Densidad terreno	[ton/m ³]	2,25	[ton/m ³]	2,25	[ton/m ³]
Velocidad excavación	[ton/hr]	90	[ton/hr]	90	[ton/hr]
Velocidad traslado	[m/hr]	10	[m/hr]	10	[m/hr]
Distancia de traslado	[m]	3326	[m]	3042	[m]
Exógeno	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]
Tiempos					
Excavación	[hr]	325,50	[hr]	325,50	[hr]
Traslado	[hr]	332,60	[hr]	304,20	[hr]
Exógeno	[hr]	219,71	[hr]	219,71	[hr]
Total (horas)	[hr]	877,81	[hr]	849,41	[hr]
Total (días)	[días]	36,58	[días]	35,39	[días]
Productividad (hora)	[ton/hr]	33,37	[ton/hr]	34,49	[ton/hr]
Productividad (día)	[ton/día]	800,95	[ton/día]	827,73	[ton/día]

Δ prod	26,78 [ton/día]
red. mts	8,5%
incr. prod	3,3%

Tabla 4: Comparativa de productividad en términos de toneladas por día y hora 2.

		Panel 7x7 sin ultimo drift			
		Metodología actual		Modelo	
Material en sub-panel	[ton]	24.097,50	[ton]	24.097,50	[ton]
Rendimiento equipo	[m³/hr]	40	[m³/hr]	40	[m³/hr]
Densidad terreno	[ton/m³]	2,25	[ton/m³]	2,25	[ton/m³]
Velocidad excavación	[ton/hr]	90	[ton/hr]	90	[ton/hr]
Velocidad traslado	[m/hr]	10	[m/hr]	10	[m/hr]
Distancia de traslado	[m]	2404	[m]	2076	[m]
Exógeno	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]
Tiempos					
Excavación	[hr]	267,75	[hr]	267,75	[hr]
Traslado	[hr]	240,40	[hr]	207,60	[hr]
Exógeno	[hr]	180,73	[hr]	180,73	[hr]
Total (horas)	[hr]	688,88	[hr]	656,08	[hr]
Total (días)	[días]	28,70	[días]	27,34	[días]
Productividad (hora)	[ton/hr]	34,98	[ton/hr]	36,73	[ton/hr]
Productividad (día)	[ton/día]	839,54	[ton/día]	881,51	[ton/día]

Δ prod	41,97 [ton/día]
red. mts	13,6%
incr. prod	5,0%

Tabla 5: Comparativa de productividad en términos de toneladas por día y hora 3.

		Panel 7x7 sin ultimo drift y cruzados			
		Metodología actual		Modelo	
Material en sub-panel	[ton]	21.262,50	[ton]	21.262,50	[ton]
Rendimiento equipo	[m³/hr]	40	[m³/hr]	40	[m³/hr]
Densidad terreno	[ton/m³]	2,25	[ton/m³]	2,25	[ton/m³]
Velocidad excavación	[ton/hr]	90	[ton/hr]	90	[ton/hr]
Velocidad traslado	[m/hr]	10	[m/hr]	10	[m/hr]
Distancia de traslado	[m]	2344	[m]	1936	[m]
Exógeno	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]
Tiempos					
Excavación	[hr]	236,25	[hr]	236,25	[hr]
Traslado	[hr]	234,40	[hr]	193,60	[hr]
Exógeno	[hr]	159,47	[hr]	159,47	[hr]
Total (horas)	[hr]	630,12	[hr]	589,32	[hr]
Total (días)	[días]	26,25	[días]	24,55	[días]
Productividad (hora)	[ton/hr]	33,74	[ton/hr]	36,08	[ton/hr]
Productividad (día)	[ton/día]	809,85	[ton/día]	865,92	[ton/día]

Δ prod	56,07 [ton/día]
red. mts	17,4%
incr. prod	6,9%

En las tablas anteriores, el tiempo de excavación corresponde a las horas necesarias para extraer las toneladas existentes en el sub-panel. Se obtiene de la razón entre toneladas totales y velocidad de excavación:

$$\text{Tiempo Excavación} = \frac{\text{Toneladas a extraer}}{\text{Velocidad de excavación}}$$

Con respecto al tiempo de traslado, se define éste como la razón entre la distancia total recorrida al ir desde un bloque de extracción al siguiente en todas las etapas de la secuencia de excavación y la velocidad de traslado operacional de los equipos (distinta a la velocidad factible de movimiento lineal del equipo):

$$\text{Tiempo Traslado} = \frac{\text{Distancia de traslado}}{\text{Velocidad de traslado(operacional)}}$$

Dentro del modelo resuelto en GAMS, la distancia de traslado corresponde al valor de la función objetivo (minimización global de los traslados entre bloques de extracción).

En cuanto al tiempo exógeno, este corresponde a todas las interferencias que ocurren en el proceso y que no son abordadas por los tiempos de excavación ni los de traslado. En ellos se contemplan procesos como cambios de turnos, mantenciones, almuerzo y desayuno de operarios, entre otros. Se emplea un parámetro constante obtenido estadísticamente en la operación de la empresa, que se ajusta con las toneladas a ser extraídas obteniéndose así las horas correspondientes.

$$\text{Tiempo Exógeno} = \text{Toneladas a extraer} * \text{Parámetro}$$

El incremento de productividad de [ton/día] entre el escenario actual y modelo para el módulo completo 26,78 [ton/día]. Este es un resultado positivo a favor de modelar la secuencia de extracción y emplear la herramienta para definición de la secuencia.

Comparando el escenario actual con el modelo para un módulo de tamaño menor, el incremento corresponde a 41,97 [ton/día] eliminando aquí la última calle de producción principal.

Con respecto al módulo sin el último drift y los cruzados adyacentes (unidad mínima realizable por condiciones de operación, el incremento representa un total de 55,07 [ton/día].

Para comprender la relevancia de extraer el material en menos tiempo, se expone la evaluación económica para el incremento de toneladas dentro del periodo que tomaría la extracción del sub-panel para cada uno de los escenarios:

Tabla 6: Incremento de utilidad en el periodo de extracción.

		Módulo 7x7 completo		Módulo 7x7 sin DR final		Módulo 7x7 sin DR y XC final	
Incremento en rendimiento	[ton/día]	26,78	[ton/día]	41,97	[ton/día]	55,07	[ton/día]
Periodo de producción	[días]	36	[días]	28	[días]	25	[días]
Sub-paneles excavables		2		2		2	
Toneladas de mineral [ton mx]	[ton]	1928,16	[ton]	2350,32	[ton]	2753,5	[ton]
Cobre total	[%]	1,20%	[%]	1,20%	[%]	1,20%	[%]
Recuperación metalúrgica	[%]	74%	[%]	74%	[%]	74%	[%]
Toneladas de cátodos de cobre producidas	[ton]	17,12	[ton]	20,87	[ton]	24,45	[ton]
Margen de utilidad referencial	[US\$/lb]	1	[US\$/lb]	1	[US\$/lb]	1	[US\$/lb]
1 [ton] = 2204.62 [lb]	[lb]	2204,62	[lb]	2204,62	[lb]	2204,62	[lb]
Incremento de utilidad en el periodo*	[US\$/periodo]	37.748	[US\$/periodo]	46.012	[US\$/periodo]	53.905	[US\$/periodo]
Incremento referencial proyectado anual*	[US\$/año]	382.719	[US\$/año]	599.803	[US\$/año]	787.018	[US\$/año]

* : Con respecto a metodología actualmente empleada

Al emplear la herramienta y la forma de extracción modular, el incremento en la utilidad operacional en cada uno de los sub-paneles analizados de extracción (periodo en torno a un mes para cada módulo) es de US\$37.748 para el primer caso, de US\$46.012 para el segundo y de US\$53.905 para el tercero. Se aprecian además los incrementos referenciales en un periodo de un año, con márgenes positivos de US\$599.803 para el escenario sin el último drift de producción, que es la condición replicable más común dentro de la unidad de explotación. Para los otros casos las cifras se pueden apreciar en la tabla anterior.

Queda de manifiesto desde una perspectiva económica la ventaja de emplear la herramienta desarrollada.

Bajo la metodología actual, el equipo de planificación debe contemplar que el plan de corto plazo se cumpla ajustándose a las metas de producción que se tienen. Realizar el proceso de decisión y asignación de frentes de extracción para el equipo roadheader solamente desde el punto de vista del diseño conceptual requiere de 2 horas de análisis. Además, en desarrollar el layout de extracción se emplean cerca de 4 horas.

La herramienta desarrollada emplea en la decisión de secuenciamiento un tiempo no superior a los 20 minutos, lo cual equivale a la sexta parte del tiempo empleado en el análisis bajo la metodología actual. Si a esto se suma la herramienta que genera el plan mediante Excel de forma automática en base al output generado por GAMS, el proceso completo correspondería a un doceavo del tiempo empleado en el análisis y desarrollo del plan, puesto que generar el plan en Excel toma unos segundos.

Se aprecia que desde una perspectiva de diseño, utilizar el modelo y la herramienta asociada representa una ventaja en cuanto al ahorro de tiempo que se genera, el cual puede ser utilizado en la resolución de otras problemáticas de la planificación, por ejemplo desarrollo de accesos, de servicios ventilación y de servicios de drenaje al interior del yacimiento.

Haciéndose cargo del aspecto de condición del terreno, se realiza una discretización más fina del layout del sub-panel. Bajo este enfoque se hace un análisis de la sensibilidad del modelo ante distintos escenarios de avance que permita el terreno, contemplando a priori que el rendimiento en toneladas por tiempo de extracción debería ser menor.

Se asume que el avance posible es la mitad del escenario anterior (sub-panel de 7x7). Es así como se analiza un panel de 10 filas x 10 columnas, con la misma cantidad de calles de producción que el anterior. A este modelo debe agregarse un conjunto extra para almacenar el segundo bloque perteneciente a cada cruzado de producción y una restricción de precedencia física del mismo tal como se muestra a continuación:

Conjuntos:

$xc2 \in XC2$: Bloques definidos como cruzados de producción (parte posterior).

Restricciones:

- R32) Criterio de extracción de parte posterior de cruzados, determinado por la precedencia física de apertura previa de la parte precedente del cruzado.

$$EX_{b1}^s \geq EX_{b2}^s \quad \forall s \in S, \forall b2 = b1 + 1, \quad b1 \in XC \subseteq B, b2 \in XC2 \subseteq B$$

La secuencia entregada por el modelo final, incorporando el conjunto y la restricción señalada, es el que se muestra en la siguiente figura:

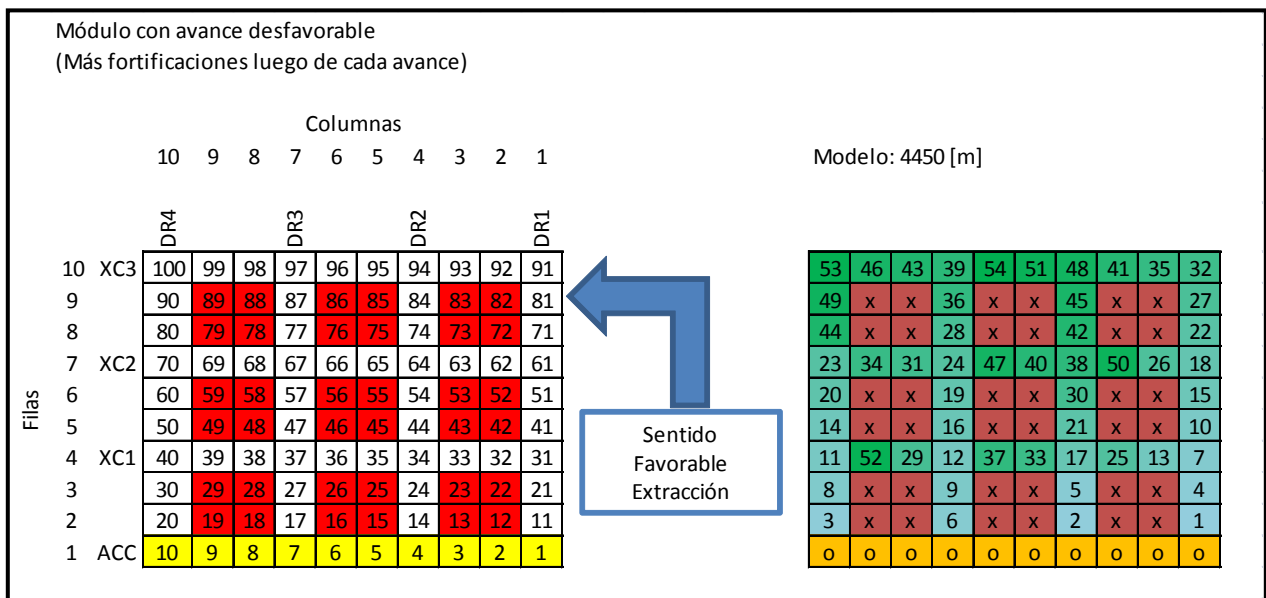


Figura 28: Resultado entregado por el modelo para sub-panel de 10x10.

Al contrastar el modelo bajo ambas conformaciones del sub-panel (módulo de estudio), es posible apreciar la baja en rendimiento. Esto resulta evidente de un análisis superficial, al ser necesarios más traslados para extraer completamente el sub-panel:

Tabla 7: Comparación de productividades para distintas discretizaciones.

		Módulo de estudio			
		Discretización normal		Discretización más fina	
Material en sub-panel	[ton]	28.644,00	[ton]	28.644,00	[ton]
Rendimiento equipo	[m ³ /hr]	40	[m ³ /hr]	40	[m ³ /hr]
Densidad terreno	[ton/m ³]	2,25	[ton/m ³]	2,25	[ton/m ³]
Velocidad excavación	[ton/hr]	90	[ton/hr]	90	[ton/hr]
Velocidad traslado	[m/hr]	10	[m/hr]	10	[m/hr]
Distancia de traslado	[m]	3042	[m]	4450	[m]
Exógeno	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]	0,0075	[hr/ton]
Tiempos					
Excavación	[hr]	318,27	[hr]	318,27	[hr]
Traslado	[hr]	304,2	[hr]	445	[hr]
Exógeno	[hr]	214,83	[hr]	214,83	[hr]
Total (horas)	[hr]	837,30	[hr]	978,10	[hr]
Total (días)	[días]	34,89	[días]	40,75	[días]
Productividad (hora)	[ton/hr]	34,21	[ton/hr]	29,29	[ton/hr]
Productividad (día)	[ton/día]	821,04	[ton/día]	702,85	[ton/día]

Viendo los valores de productividad por día para cada discretización, se aprecia que la merma a causa del terreno, el avance factible y las fortificaciones necesarias es de 118,19 [ton/día] al correr el modelo con la discretización más fina. Lo anterior tiene sentido al incurrirse en mas traslados y necesitar más tiempo para dicha función, lo que juega en contra del resultado global pero que sirve para dimensionar escenarios alternativos para cada área que se pretenda excavar.

La ventaja de tener escenarios alternativos y un tiempo de resolución razonable del modelo radica en que se puede ajustar la producción a distintas alternativas que puedan acontecer, fijándose escenarios pesimistas, neutros y optimistas para definir las labores a extraer.

8. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

Utilizando la herramienta desarrollada se cumple con cada uno de los objetivos planteados al iniciarse la memoria. Se desarrolló un modelo de programación matemática que mejora la secuencia de extracción. Además, de la aplicación de la secuencia obtenida, se aumentan las toneladas diarias de material extraído, se disminuyen los traslados de los equipos, las distancias involucradas, los tiempos necesarios para los traslados y se contemplan las condiciones de seguridad necesarias para la extracción.

En base a los resultados obtenidos del desarrollo del modelo (en cada una de las etapas necesarias para su concepción) es posible afirmar con datos objetivos que el modelo aporta al proceso de planificación desde distintas perspectivas.

Se reducen los tiempos empleados en la planificación. Lo anterior se logra gracias al tiempo que demora en algoritmo en obtener una solución para cada uno de los módulos que puede componer una unidad de producción. Se obtuvieron resultados del orden de 20 minutos necesarios para completar el proceso de solución del modelo por parte del solver CPLEX, los cuales son considerablemente menores a las 2 horas empleadas actualmente solo en lo que corresponde al análisis del secuenciamiento.

Es posible apreciar que la herramienta desarrollada reduce en un 8,5% la distancia de traslado con respecto a la metodología de planificación actual, desde 3326[m] de traslado a 3042[m]. Este resultado es de alto impacto para las operaciones de extracción, dado que con solo reducir los días de traslado (al recorrerse menos distancia) se incrementa el índice de toneladas por día extraídas del sub-panel.

Por otra parte, la reducción de la distancia de traslado posibilita emplear el tiempo ahorrado (de los metros de traslado que no se recorrerán) en otras tareas relevantes para la extracción de mineral, en particular para aumentar la cantidad de mineral extraído por el equipo de excavación. Con lo anterior, el potencial de aumento de la producción es mayor.

Pensando en una evaluación económica del beneficio obtenido al abordar el problema bajo modelamiento de programación matemática y su posterior resolución, se aprecia que la mayor productividad (en cuanto a las toneladas por día) se traduce en incrementos de US\$38M, US\$46M y US\$54M para cada uno de los paneles en estudio y sus periodos de evaluación respectivos, lo que proyectado en un periodo de un año significa un aumento de US\$ 383M, US\$600M y US\$787M respectivamente.

Atacar modularmente la unidad de extracción permite alternativas de ejecución distintas a las que actualmente se empleaban. Posibilita un diseño “estándar” del cual se pueden obtener reglas de acción para orientar los equipos de producción en cada uno de los bloques que componen el módulo de análisis.

Bajo el diseño modular se aborda de lleno la problemática del área máxima, sin tener que preocuparse por condiciones adicionales a las que están directamente ligadas a la producción y operación de los equipos de excavación. Además, es posible atacar en una escala manejable el problema de los traslados.

Contemplando un análisis paralelo del los resultados obtenidos, es posible identificar que los esfuerzos estratégicos de la empresa (en cuanto a la operación extractiva) deben ir orientados a emplear procedimientos y tecnologías de estabilización

del terreno que garanticen la operación de los equipos de excavación. Esto último en base al resultado obtenido de realizar una discretización más fina de área de análisis, de donde se concluye que los traslados a causa de las sucesivas fortificaciones necesarias repercuten negativamente en cuanto a las toneladas de mineral extraído por día.

El desarrollo del modelo de programación matemática, en lo que corresponde al diseño, resultó ser más complicado que lo presupuestado. El resultado final obtenido desde el punto de vista del modelo y la comprensión del mismo, deja satisfecho al desarrollador. Lo anterior, por cuanto el desarrollo de modelos y herramientas de fácil comprensión posibilita una transmisión de los conceptos involucrados más expedita a las personas que deban utilizarlo, en particular al equipo de planificación.

Queda de manifiesto, en la metodología empleada para el desarrollo de la herramienta, que son necesarias aproximaciones de forma iterativa y con las simplificaciones que correspondan en pos de asegurar por un lado el modelamiento del problema y por otro lado la representatividad del mismo en el modelo. Gracias a lo anterior es que se pudo representar de forma simple y ajustada a lo que ocurre en la realidad el proceso de extracción al interior de la mina.

Comprender en forma minuciosa la operación al interior del yacimiento fue uno de los aspectos clave para poder realizar las simplificaciones necesarias al modelo. Inicialmente se contemplaron aspectos que no eran relevantes para el objetivo primordial de obtener la secuencia de extracción, los cuales en la medida que se avanzó en el desarrollo del modelo fueron descartados.

Dentro del análisis desarrollado, se llega a la conclusión de que la única decisión relevante es determinar la calle de producción donde se extraerá mineral. Dicha decisión arrastra una serie de procesos en los periodos posteriores de la extracción y en los desarrollos previos necesarios para operar en cada frente.

Se deja propuesto para futura investigación el desarrollo de un modelo que integre las leyes del mineral bajo el método de extracción abordado, punto que puede tener un impacto aún mayor en la conformación de la secuencia de extracción.

Finalmente, se evidencia que es necesario transar en varios óptimos locales al minimizar la distancia total entre traslados, con el fin de obtener el óptimo global del problema resuelto.

BIBLIOGRAFÍA

A. Trabajos citados

1. **Agencia EFE.** "Exportaciones de cobre cayeron un 17,98 por ciento en 2009". [En línea] 15 de enero de 2010. [Citado el: 31 de agosto de 2010.] <http://bit.ly/fMABPK>.
2. **Reuters.** "Exportaciones cobre Chile suben 6,8 pct en octubre". [En línea] 15 de noviembre de 2010. [Citado el: 07 de diciembre de 2010.] <http://bit.ly/h9FRGv>.
3. **Grossmann, I. & Lerchs, H.** "*Optimum design of open pit mines*". Canadian Institute Mining Bulletin, N° 58. 1965.
4. **Comisión Chilena del Cobre - COCHILCO.** "Expertos consultados por Cochilco corrigen a la baja proyección de precio del cobre para 2011". [En línea] 06 de julio de 2010. [Citado el: 07 de julio de 2010.] <http://bit.ly/bn70gx>.
5. **Pizarro, Carolina.** "Bancos de inversión anticipan que cobre llegará en 2011 a su mayor valor en cuatro décadas". *Diario La Tercera, Negocios, Santiago, Chile*. Lunes 27 de septiembre, 2010, página 16.
6. **COCHILCO, Comisión Chilena del Cobre -.** "Mercado internacional del cobre (Semana del 06 al 10 de diciembre de 2010)". [En línea] 10 de diciembre de 2010. [Citado el: 10 de diciembre de 2010.] <http://bit.ly/dE3aGF>.

B. Referencias bibliográficas

7. **Goic, Marcel.** "*Formulación e implementación de un modelo de programación matemática para la planificación de largo plazo en minería a cielo abierto*". Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Industrial y al grado de Magister en Gestión de Operaciones, Universidad de Chile. Santiago de Chile, octubre de 2003.
8. **Pererira, Marianela.** "*Construcción de un modelo agregado de planificación minera*". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile. Santiago de Chile, abril de 2007.
9. **Santibañez, Pablo.** "*Metodología para la evaluación y optimización de planes mineros de largo plazo*". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile. Santiago, octubre de 2000.
10. **Schultz, Ximena.** "*Agregación de un modelo de planificación minera utilizando agregación de clúster a priori*". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile. Santiago de Chile, abril de 2007.

11. **Vega, Ricardo.** *"Simplificación de un modelo de planificación minera con agregación a priori y a posteriori para Codelco"*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile. Santiago de Chile, agosto de 2008.
12. **GAMS Development Corporation.** *"GAMS | A User's Guide"*. Washington, DC, USA : s.n., 2010.
13. **McCarl, Bruce A. et al.** *"McCarl GAMS User Guide - Version 23.3"*. 2010.
14. **Bayer, A.K. & Nienhaus, K.** *"Capacity model for room & pillar operations with continuous miners"*. University of Technology Aachen, Excavation and Mining Equipment Group (BGMR). Aachen, Germany, 2001.
15. **Bustos, A. & Silva, P.** *"Modelo de programación y reprogramación de actividades para una mina subterránea"*. Trabajo de título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Santiago de Chile. 2004.
16. **Sepúlveda, J. & Dubos, C.** *"A generalized constraint-programming model for front loader scheduling in underground mining operations"*. Third International Conference on Production Research - Americas' Region. Curitiba, Brasil, julio de 2006.
17. **Vásquez O. & Sepúlveda, J.** *"Decision rules for routing vehicles in underground mining operations"*. Workshop on operations research in mining. Viña del Mar, diciembre de 2008.

ANEXOS

A. Depósitos tipo pórfido

Los pórfidos son esencialmente depósitos minerales de baja ley y gran tonelaje. Se denominan pórfidos porque frecuentemente, pero no exclusivamente, se asocian con rocas ígneas³ intrusivas con fenocristales⁴ de feldespato en una masa fundamental cristalina de grano fino.

Estos yacimientos afloran generalmente en márgenes continentales destructivos, especialmente en zonas de subducción. Se forman básicamente por procesos supérgenos y que se componen de las siguientes fases:

- Oxidación → destrucción de sulfuros hipógenos.
- Lixiviación → remoción de metales en solución como sulfatos.
- Reacción con minerales de las rocas o ganga → minerales oxidados estables.
- Precipitación de sulfuros supérgenos (bajo el nivel de aguas subterráneas).

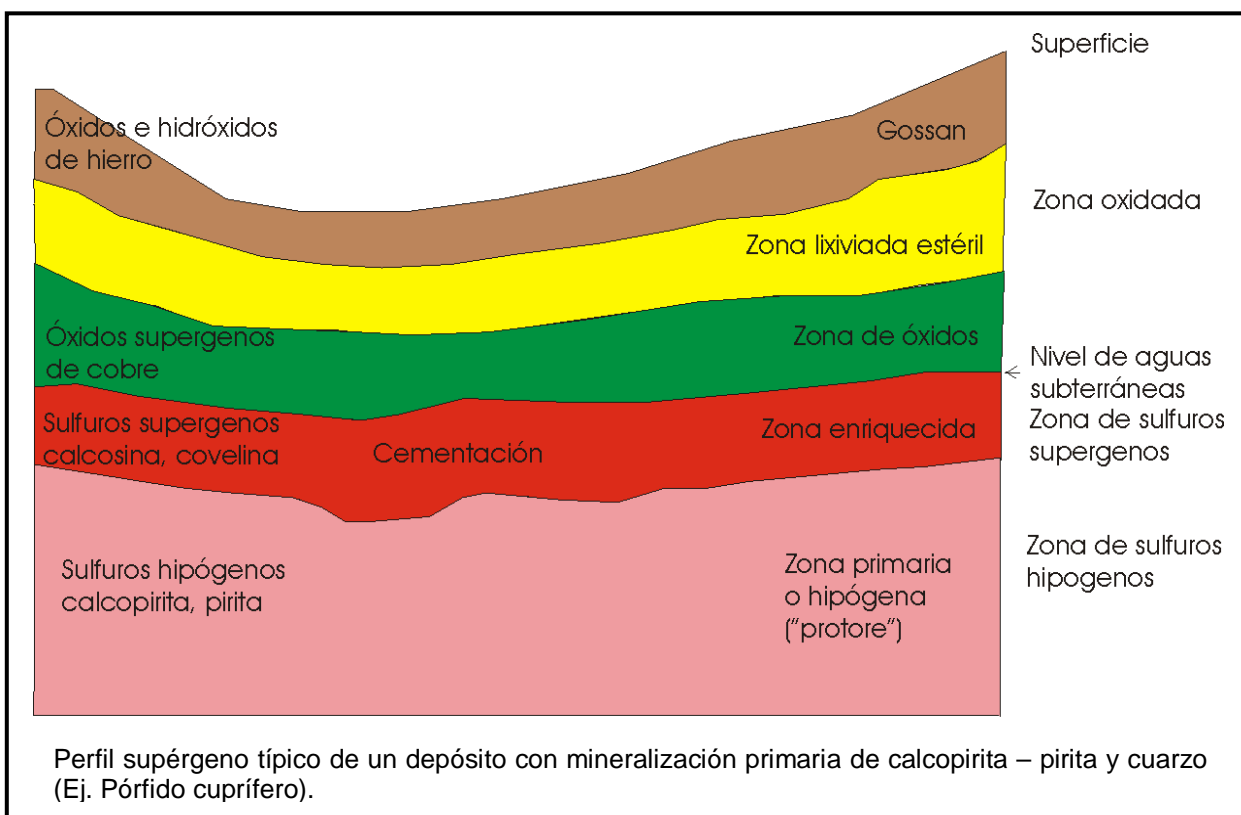


Figura 29: Formación por proceso supérgeno de un pórfido cuprífero.

³ Se identifican como rocas ígneas aquellas que se forman cuando el magma (roca fundida) se enfría y se solidifica.

⁴ Un fenocristal es un cristal de tamaño considerable respecto al resto de sus componentes, como resultado de un enfriamiento lento en el proceso de cristalización del magma. Ejemplos son: granate, cuarzo, feldespato, biotita, piroxeno, anfíbol, plagioclasa, olivino.

Más del 50% de la producción de Cu mundial proviene de este tipo de depósitos. La mayor parte de la producción chilena de cobre proviene de 16 pórfidos cupríferos en explotación, 12 en el Norte de Chile y 4 en la Zona Central. Chile posee algunos de los pórfidos cupríferos más grandes del mundo como El Teniente y Chuquicamata.

Para ejemplificar lo anterior, en el caso de Chuquicamata el yacimiento posee más de 10 billones de toneladas de mineral con ley de 0,56% Cu.

La conformación espacial de un pórfido cuprífero es la que se aprecia en la figura siguiente:

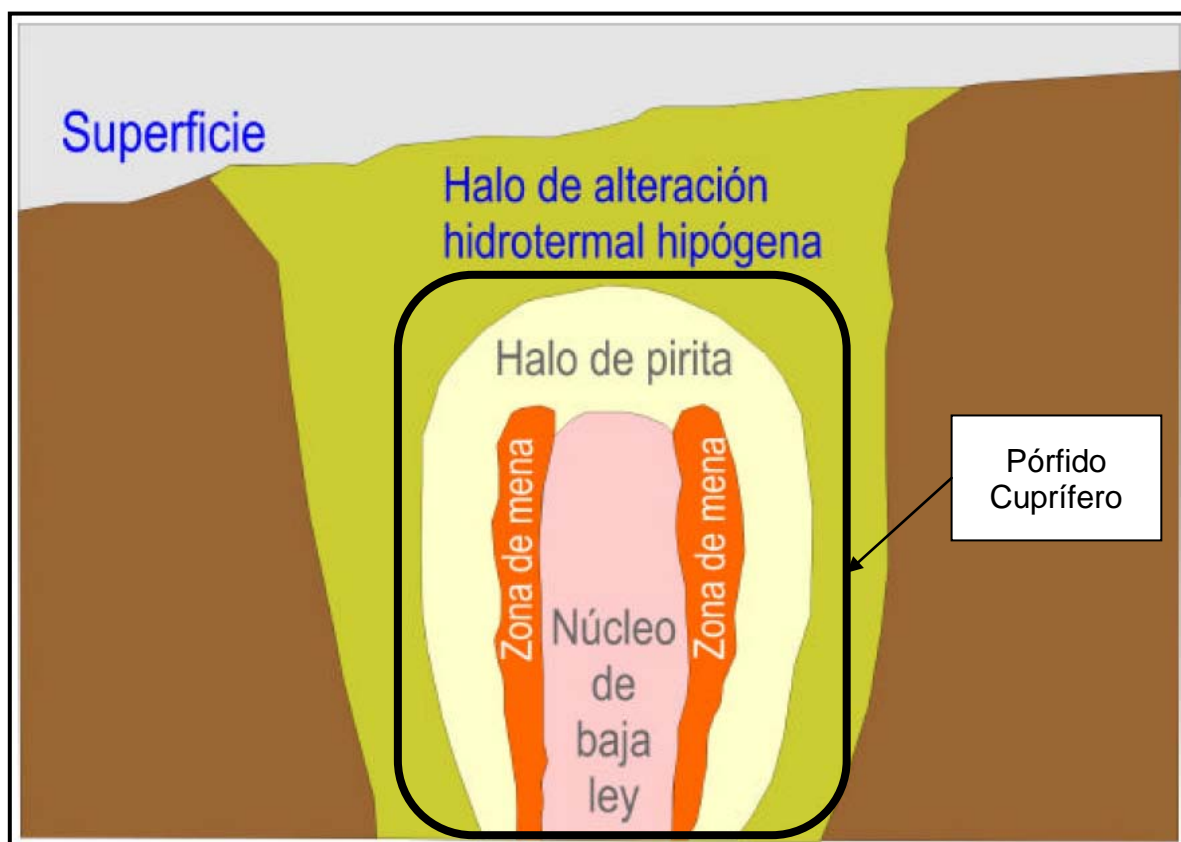


Figura 30: Conformación espacial de un pórfido cuprífero.

B. Depósitos exóticos

Los depósitos exóticos se forman como una parte de los procesos de oxidación y enriquecimiento supérgeno.

La génesis de yacimientos exóticos (mineralización exótica) obedece principalmente a la migración lateral de soluciones supérgenas, según se puede apreciar en la siguiente figura:

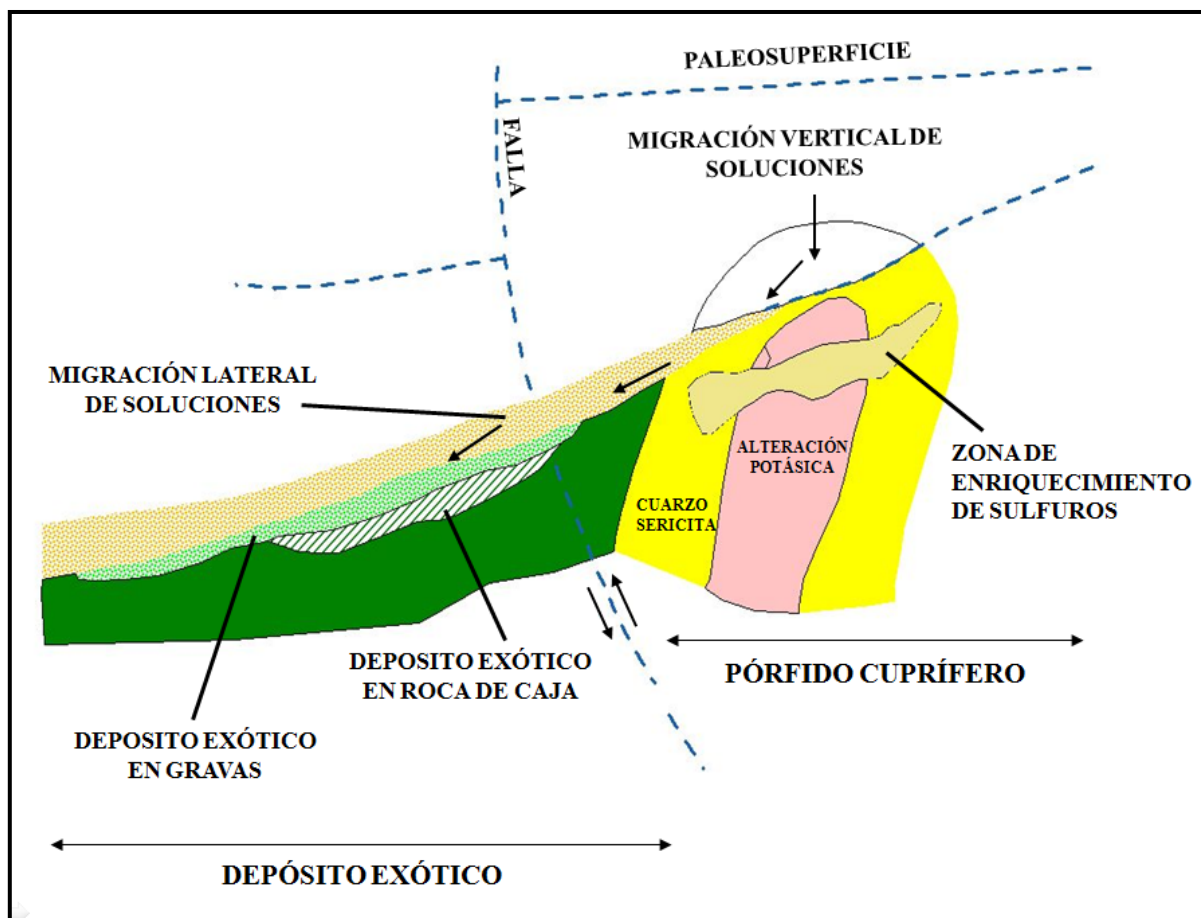


Figura 31: Modelo de formación de un depósito Exótico.

En la figura anterior, se puede apreciar como la parte superior del pórfido cuprífero madre es arrastrado por soluciones de los procesos supérgenos y se deposita en algún lugar aguas abajo. Dicha depositación se produce por sedimentación de los minerales en el terreno, conformando espacialmente un manto.

Existen yacimientos exóticos de los cuales se conoce su origen, es decir, de cual pórfido cuprífero provienen. Un ejemplo es el caso del yacimiento perteneciente a Codelco Norte conocido como Mina Sur (anteriormente conocida como Mina Exótica por su conformación) la cual proviene del depósito tipo pórfido cuprífero Chuquicamata. La conformación se puede apreciar en la siguiente figura:

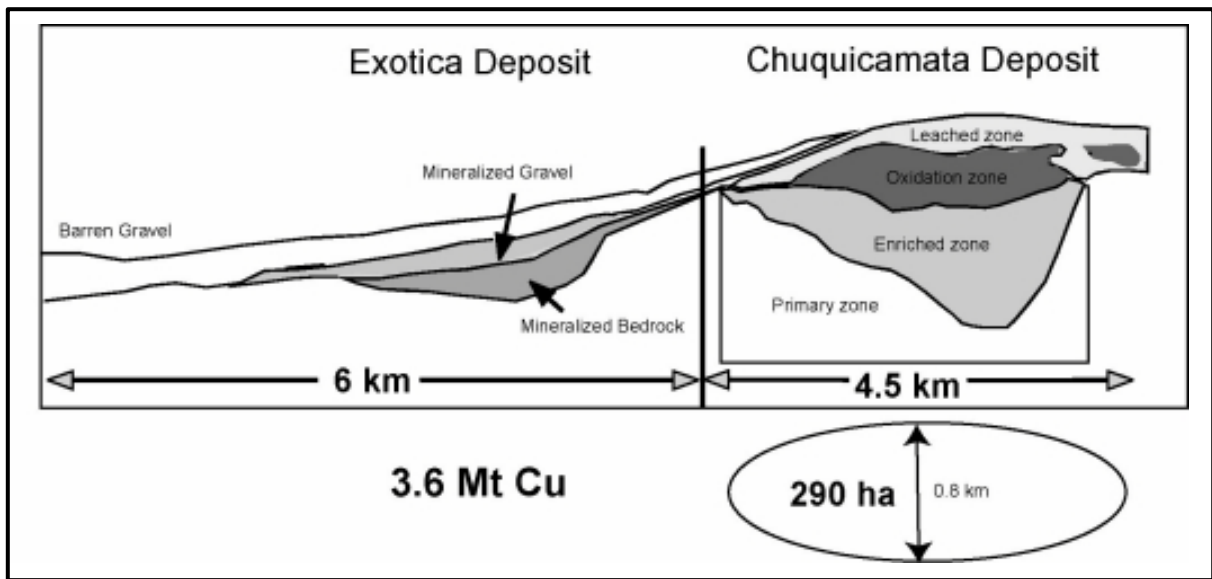


Figura 32: Yacimiento exótico y su yacimiento origen en Codelco Norte.

En el caso del yacimiento tipo exótico Longacho ubicado en la quebrada de Sagasca, su yacimiento madre se desconoce a la fecha. Se cree que el yacimiento madre sería Cerro Colorado, pero con la información actualmente manejada por HMC es imposible afirmar con un grado de certeza razonable que esto sea así.

C. Minería subterránea: métodos de extracción y clasificación

Dentro de la minería subterránea, se aprecian algunas características comunes para abordar los yacimientos de esta forma,

- Utilizado para yacimientos de mediana y alta ley.
- Ritmos de producción 500-50000 [tpd]⁵.
- Más selectivo que el método de cielo abierto (open pit), a excepción de los métodos por hundimiento.
- Existen problemáticas relacionadas con el diseño:
 - Geometría de la mina subterránea
 - Estabilidad y soporte
 - Ubicación de los accesos
 - Logística para el transporte y movimiento de mineral subterráneo

Las excavaciones tienen distinta vida útil, dependiendo de la cantidad de mineral, la sobrecarga existente, la competencia de la roca y la ley del mineral existente.

Los métodos de explotación de yacimientos mineros subterráneos se agrupan en 3 grandes tipos, categorizados por sus características operacionales. Estos son apreciables en la siguiente figura:

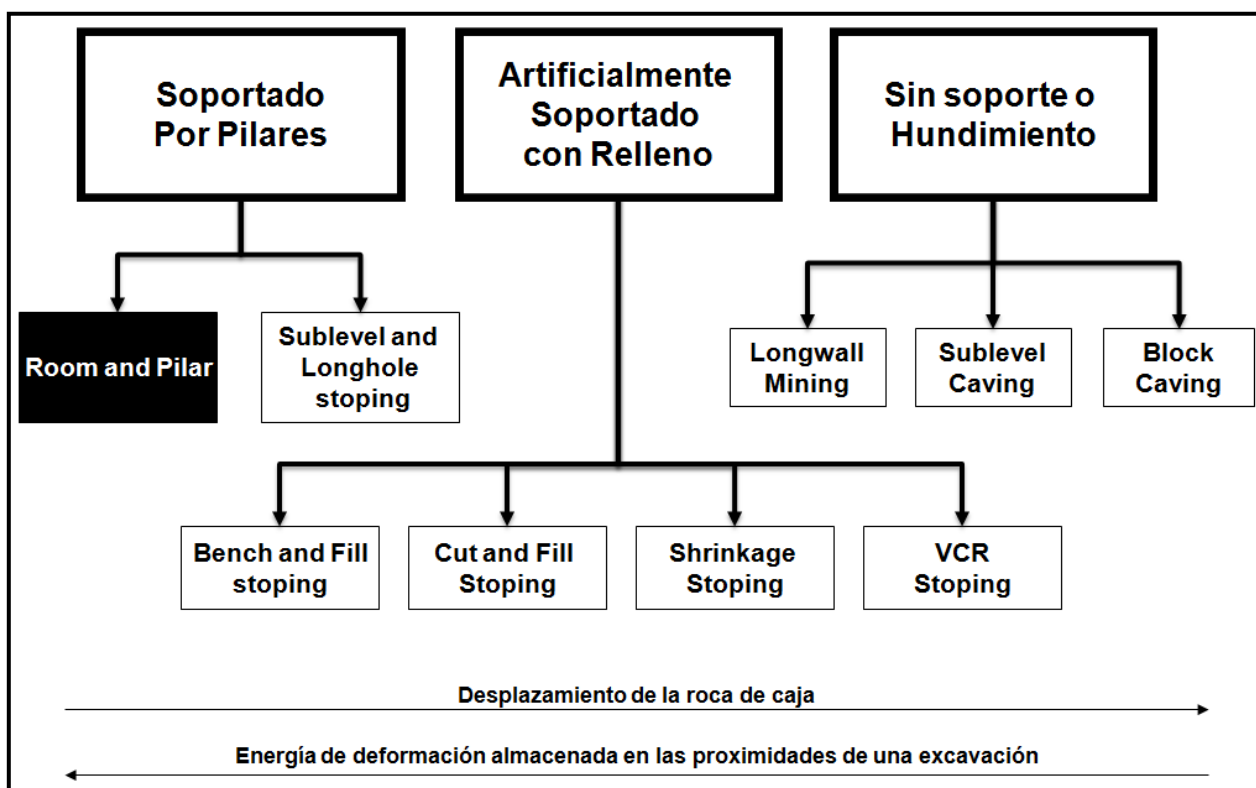


Figura 33: Clasificación de métodos de extracción de yacimientos.

⁵ [tdp] = toneladas por día.

D. Room and Pillar (Room & Pillar)

El método de cámaras y pilares (room and pillar) se utiliza en cuerpos horizontales o con poco buzamiento⁶ (mantos). Se dejan pilares de roca para sostener el techo de la cámara. Estos pueden disponerse de una manera regular (room and pillar s.s.) o irregular (casual pillars, o room and pillar s.l.).

Algunas características del método son las siguientes:

- Empleado en cuerpos mineralizados mantiformes y de baja potencia.
- La calidad de la roca de caja y mineral deben ser competentes (2B).
- Se dejan pilares para mantener el techo y las paredes estables.
- Se deben diseñar los pilares y los caserones para maximizar la recuperación de mineral.
- Cuerpos mineralizados con potencias mayores a 10m y menores a 30 m se explotan por sub-niveles desde el techo al piso.
- Baja dilución, menor a 5%, dónde

$$\%Dilución = \frac{\text{Estéril}}{\text{Mineral}}$$

- Recuperación baja, menor a 75% (reservas con respecto a recursos).
- Costo de producción 10-20\$/t.

Primero se recupera el mineral de los caserones y luego se recupera el mineral de los pilares. La recuperación de los pilares se puede realizar de varias maneras:

- Recuperación con hundimiento controlado del techo.
- Recuperación de pilares en forma alternada.
- Recuperación parcial de pilares.

Deben contemplarse la habilitación de servicios esenciales para la producción, como el desarrollo de accesos, ventilación al interior de los accesos y los frentes de producción, drenaje en caso de existir agua al interior del yacimiento y la habilitación de electricidad para los jumbos de perforación y otras maquinas que lo requieran.

Un esquema del método empleando perforación y tronadura se presenta en la imagen siguiente:

⁶ El buzamiento es el sentido u orientación de la inclinación de los estratos en un relieve de plegamiento formado en rocas sedimentarias, que son las que se disponen en forma de capas o estratos. Corresponde ángulo que forma el plano a medir con respecto a un plano horizontal, el cual debe ir acompañado por el sentido en el que el plano baja (buza).

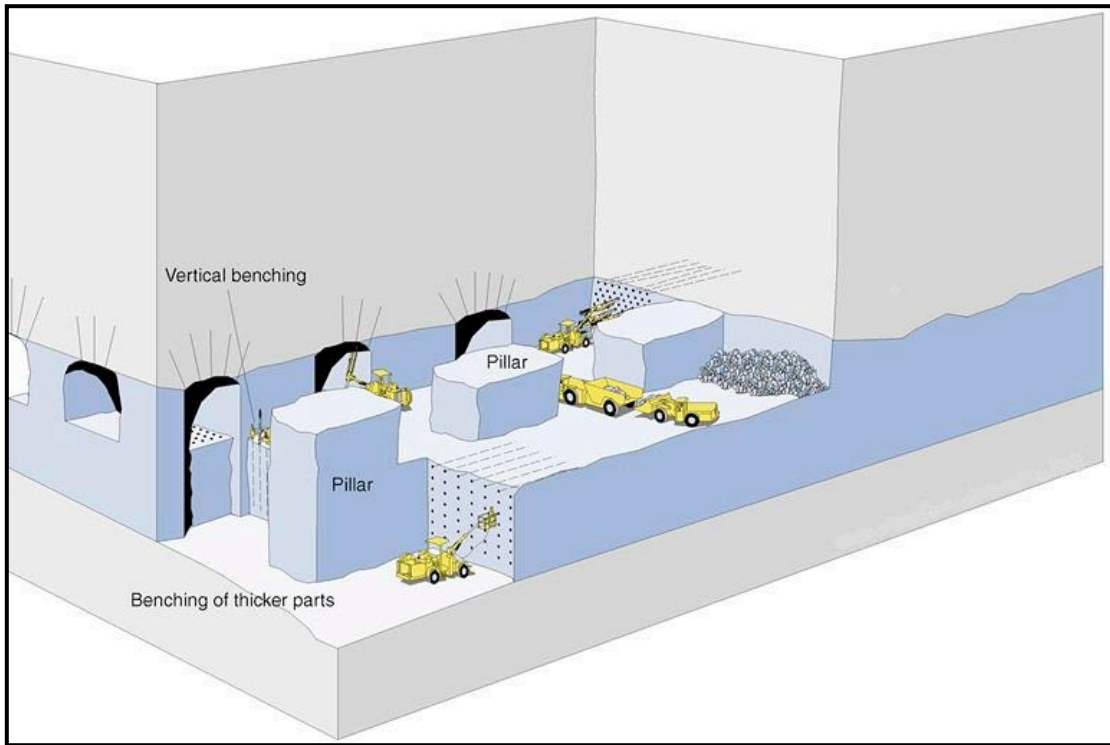


Figura 34: Room and pillar mediante perforación y tronadura.

Se aprecian en la producción jumbos de perforación, LHD para sacar el material y camiones de bajo perfil para el transporte.

E. Proceso productivo en mina subterránea Longacho

En la figura que se aprecia a continuación, se describen gráficamente los componentes del proceso productivo al interior del yacimiento Longacho y las funciones que cumple cada una de las maquinarias empleadas.

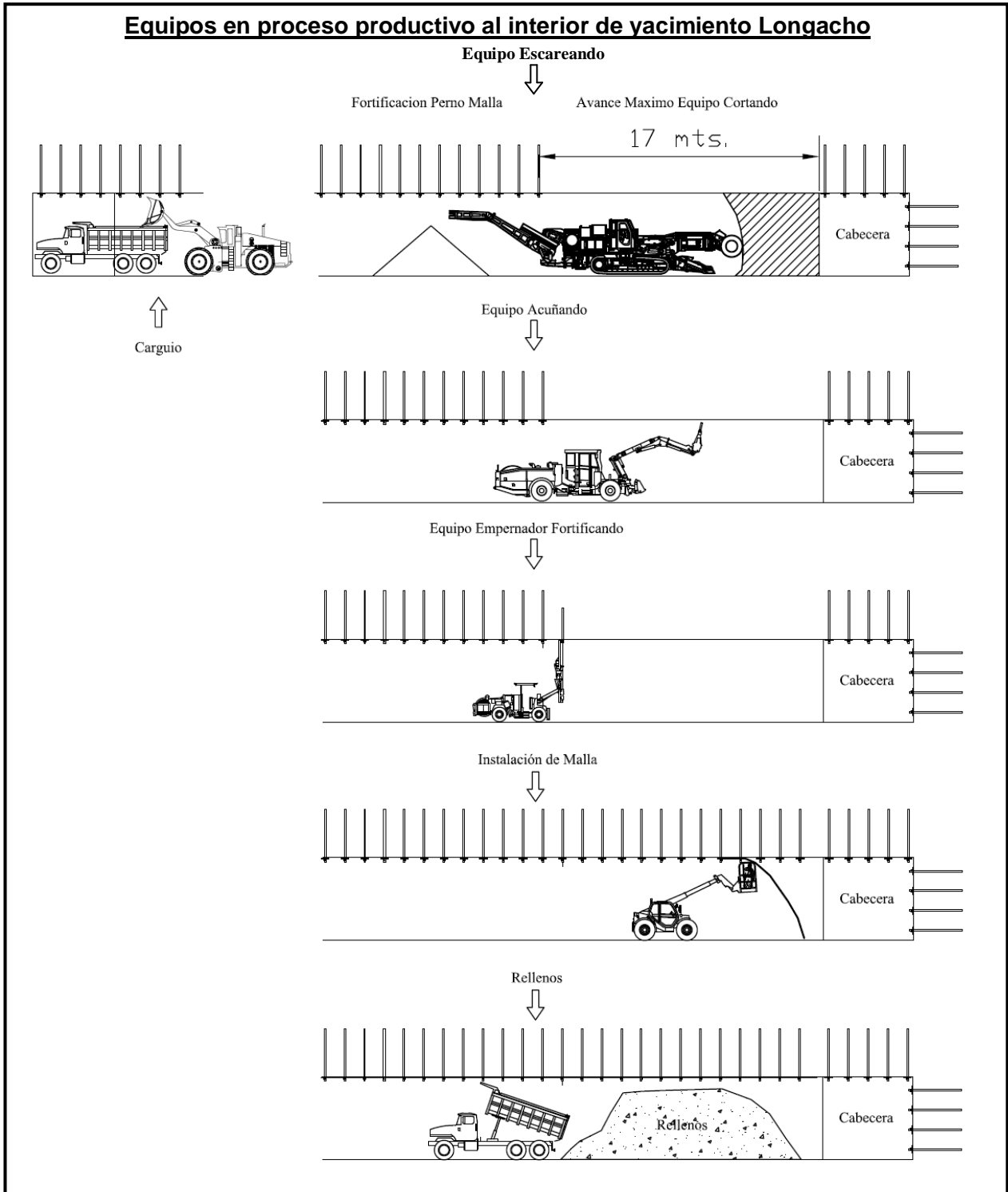


Figura 35: Proceso productivo en mina subterránea.

F. Modelo desarrollado en GAMS

sets

```
n          'bloques a analizar'          $include bloques_n.inc
n1(n)     'bloque aux 1'                $include bloques_n.inc
n2(n)     'bloque aux 2'                $include bloques_n.inc
s0        'etapas con condición de borde' $include secuencia0.inc
s(s0)     'etapas'                      $include secuencia.inc
p(n)      'bloques (pilares) no extraíbles' $include pilares.inc
e(n)      'bloques extraíbles'          $include excavables.inc
a(n)      'bloques accesos (extraídos en s0=0)' $include accesos.inc
c01b(n)   'bloques columna 1'          $include dr1.inc
c02b(n)   'bloques columna 2'          $include dr1-dr2.inc
c03b(n)   'bloques columna 3'          $include dr2.inc
c04b(n)   'bloques columna 4'          $include dr2-dr3.inc
c05b(n)   'bloques columna 5'          $include dr3.inc
c06b(n)   'bloques columna 6'          $include dr3-dr4.inc
c07b(n)   'bloques columna 7'          $include dr4.inc
f01b(n)   'bloques fila 1'             $include xc1.inc
f03b(n)   'bloques fila 3'             $include xc2.inc
f05b(n)   'bloques fila 5'             $include xc3.inc
f07b(n)   'bloques fila 7'             $include xc4.inc
cru(n)    'bloques XC entre 2 DR (1er)' $include cru.inc
*Descomentar al realizar una discretización más fina
*cru2(n)  'bloques XC entre 2 DR (2do)' $include cru2.inc
*cru3(n)  'bloques XC entre 2 DR (3ro)' $include cru3.inc
icr(n)    'bloques antes de un XC entre 2 DR' $include icr.inc
dcr(n)    'bloques después de un XC entre 2 DR' $include dcr.inc
;
```

```
*$call =xls2gms i=pruebas/m100b.xlsx r1=d_nan!aj213:ef313 o1=m100b_dnan.inc
```

```
$call =xls2gms i=pruebas/m49b.xlsx r1=d_nan_ji!cn8:ek57 o1=m49b_dnan.inc
```

table

```
d_nan(n,n)      'distancia operacional definida por (b1,a1)+(a1,a2)+(a2,b2)'
```

```
*$include m100b_dnan.inc
```

```
$include m49b_dnan.inc
```

variables

```
*#Variables libres
```

```
vo              'variable para función objetivo'
```

```
*#Variables de decisión
```

```

x(s0,n)          'decisión de extracción de bloque en cada etapa {0,1}'
*#variables de estado
ex(s0,n)         'bloques extraídos hasta etapa s (sin considerar decisión del periodo) {0,1}'
tr(s,n,n)        'variable de control de x(s-1,n2) y x(s,n2) para distancia {0,1}'
xx(n,s0)         'igual a x, pero vista por (bloque, período)'
;

binary variables x, tr, df;

equation fobj          'restricción de variable vo para FO';
    fobj..             vo =E= sum[(s,n1,n2) , tr(s,n1,n2)*d_nan(n1,n2)];
equation r0a           'no extraer bloques pilares durante todo s contemplando borde en s0';
    r0a..              sum[(s,p) , x(s0,p)] =E= 0;
equation r0b           'no extraer bloques (x(0,a(n))=1) acceso durante s';
    r0b..              sum[(s,a) , x(s,a)] =E= 0;
equation r0c(a)        'condición de borde ex(0,a(n)) para bloques acceso';
    r0c(a)..           ex("0",a) =E= 1;
equation r0d(e)        'condición de borde ex(0,e(n)) para bloques explotables';
    r0d(e)..           ex("0",e) =E= 0;
equation r0e(p)        'condición de borde ex(0,p(n)) para bloques pilares';
    r0e(p)..           ex("0",p) =E= 0;
equation r0f(n)        'condición de borde de x(s0,n) en s0=0 (x=0)';
    r0f(n)..           x("0",n) =E= 0;
equation r0g(s,n)      'recursión de bloques extraídos de s-1 a s';
    r0g(s,n)..         ex(s,n) =E= ex(s-1,n) + x(s-1,n);
equation r0h(s,n)      'extraer bloques que no se hayan extraído aun';
    r0h(s,n)..         x(s,n) =L= (1 - ex(s,n));
equation r0i(s)        'extraer 1 solo bloque (de los extraíbles) en cada etapa de s';
    r0i(s)..           sum[(e) , x(s,e)] =E= 1;
equation r0j(e)        'extraer una vez cada bloque (de los extraíbles) como máximo durante s';
    r0j(e)..           sum[(s) , x(s,e)] =E= 1;

alias(c01b,aux1);
equation r1a(s,c01b,aux1) 'precedencia física de extracción columna 1';
    r1a(s,c01b,aux1)$(ord(c01b) LT ord(aux1))..           ex(s,c01b) =G= ex(s,aux1);
alias(c03b,aux2);
equation r1b(s,c03b,aux2) 'precedencia física de extracción columna 3';
    r1b(s,c03b,aux2)$(ord(c03b) LT ord(aux2))..           ex(s,c03b) =G= ex(s,aux2);
alias(c05b,aux3);
equation r1c(s,c05b,aux3) 'precedencia física de extracción columna 5';
    r1c(s,c05b,aux3)$(ord(c05b) LT ord(aux3))..           ex(s,c05b) =G= ex(s,aux3);
alias(c07b,aux4);
equation r1d(s,c07b,aux4) 'precedencia física de extracción columna 7';
    r1d(s,c07b,aux4)$(ord(c07b) LT ord(aux4))..           ex(s,c07b) =G= ex(s,aux4);

```

equation r2a(s,cru,icr) 'precedencia física de apertura de cruzados (icr antes que cru)';
 $r2a(s,cru,icr)\$(ord(cru) EQ ord(icr)).. \quad ex(s,icr) =G= ex(s,cru);$

*Descomentar al realizar una discretización más fina

* equation r2b(s,cru,cru2) 'precedencia física de apertura de cruzados (cru antes que cru2)';
 $r2b(s,cru,cru2)\$(ord(cru) EQ ord(cru2)).. \quad ex(s,cru2) =L= ex(s,cru);$

* equation r2c(s,cru3,cru2) 'precedencia física de apertura de cruzados (cru2 antes que cru3)';
 $r2c(s,cru3,cru2)\$(ord(cru3) EQ ord(cru2)).. \quad ex(s,cru2) =G= ex(s,cru3);$

alias(c02b,aux5);
equation r2d(s,c02b,aux5) 'precedencia física de extracción columna 2';
 $r2d(s,c02b,aux5)\$(ord(c02b) LT ord(aux5)).. \quad ex(s,c02b) =L= ex(s,aux5);$

alias(c04b,aux6);
equation r2e(s,c04b,aux6) 'precedencia física de extracción columna 4';
 $r2e(s,c04b,aux6)\$(ord(c04b) LT ord(aux6)).. \quad ex(s,c04b) =L= ex(s,aux6);$

alias(c06b,aux7);
equation r2f(s,c06b,aux7) 'precedencia física de extracción columna 6';
 $r2f(s,c06b,aux7)\$(ord(c06b) LT ord(aux7)).. \quad ex(s,c06b) =L= ex(s,aux7);$

equation r3_a(s,cru,icr) 'condición de fortificación (de cruzados en filas)';
 $r3_a(s,cru,icr)\$(ord(cru) EQ ord(icr)) \quad (1 - x(s,icr)) =G= x(s+1,cru);$

equation r4a(s,c01b,aux1) 'condición de fortificación (columna 1)';
 $r4a(s,c01b,aux1)\$(ord(c01b) LT ord(aux1)).. \quad (1 - x(s,c01b)) =G= x(s+1,aux1);$

equation r4b(s,c03b,aux2) 'condición de fortificación (columna 3)';
 $r4b(s,c03b,aux2)\$(ord(c03b) LT ord(aux2)).. \quad (1 - x(s,c03b)) =G= x(s+1,aux2);$

equation r4c(s,c05b,aux3) 'condición de fortificación (columna 5)';
 $r4c(s,c05b,aux3)\$(ord(c05b) LT ord(aux3)).. \quad (1 - x(s,c05b)) =G= x(s+1,aux3);$

equation r4d(s,c07b,aux4) 'condición de fortificación (columna 7)';
 $r4d(s,c07b,aux4)\$(ord(c07b) LT ord(aux4)).. \quad (1 - x(s,c07b)) =G= x(s+1,aux4);$

equation r4e(s,c01b,aux1) 'condición de fortificación (columna 1)';
 $r4e(s,c01b,aux1)\$(ord(c01b) LT ord(aux1)).. \quad (1 - x(s,c01b)) =G= x(s+2,aux1);$

equation r4f(s,c03b,aux2) 'condición de fortificación (columna 3)';
 $r4f(s,c03b,aux2)\$(ord(c03b) LT ord(aux2)).. \quad (1 - x(s,c03b)) =G= x(s+2,aux2);$

equation r4g(s,c05b,aux3) 'condición de fortificación (columna 5)';
 $r4g(s,c05b,aux3)\$(ord(c05b) LT ord(aux3)).. \quad (1 - x(s,c05b)) =G= x(s+2,aux3);$

equation r4h(s,c07b,aux4) 'condición de fortificación (columna 7)';
 $r4h(s,c07b,aux4)\$(ord(c07b) LT ord(aux4)).. \quad (1 - x(s,c07b)) =G= x(s+2,aux4);$

equation r5(s0,n) 'restricción sobre xx = x';
 $r5(s0,n).. \quad x(s0,n) =e= xx(n,s0);$

```

equation r6_a(s,n1,n2)          'restricción sobre tr (empujar hacia arriba);
      r6_a(s,n1,n2)..          tr(s,n1,n2) =G= x(s-1,n1) + x(s,n2) - 1.5;
equation r6_b(s,n1,n2)          'restricción sobre tr (empujar hacia abajo);
      r6_b(s,n1,n2)..          tr(s,n1,n2) =L= x(s,n2);
equation r6_c(s,n1,n2)          'restricción sobre tr (empujar hacia abajo);
      r6_c(s,n1,n2)..          tr(s,n1,n2) =L= x(s-1,n1);

```

```

model m_longacho_final /all/;

```

```

*Descomentar para utilizar solver específico

```

```

*option lp = cplex;
*option nlp = minos;
option mip = cplex;
*option mip = bdmip
*option mip = cplex;
*option mip = glpk
*option mip = osl;
*option rmip = cplex;
*option minlp = bonmin;
*option minlp = couenne;
*option rminlp = conopt;
*option rminlp = minos;

```

```

solve m_longacho_final using mip minimizing vo;

```

```

display vo.L;
display x.L;
display ex.L;
display tr.L;
display xx.L;
display m_longacho_final.modelstat;
display m_longacho_final .solvestat;
display m_longacho_final.resusd;

```

```

execute_unload "secuencia.gdx" xx.L

```

```

execute 'gdxrw.exe secuencia.gdx o=secuencia.xls var=xx.L'

```


G. Características de los equipos productivos

➤ Roadheader

Equipo de minería continua de alta capacidad.

Rendimiento por equipo 1.000 [tpd]

Consumo Eléctrico: 1,3 [Mw]

Técnica excavación: Cabeza rozadora (sin uso de explosivos).

Baja velocidad de traslado del equipo.

De bajo perfil.



Figura 36: Equipo roadheader.

➤ Jumbo emperrador mecanizado

Empleado para la fortificación de túneles y galerías.

Pueden instalar pernos de 2,4 [m] y de 3,2 [m], con un diámetro de 22 [mm].

Brazo BUT 35 HB

Casetera para 10 pernos (reserva) más 1 perno en el brazo emperrador

De bajo perfil.

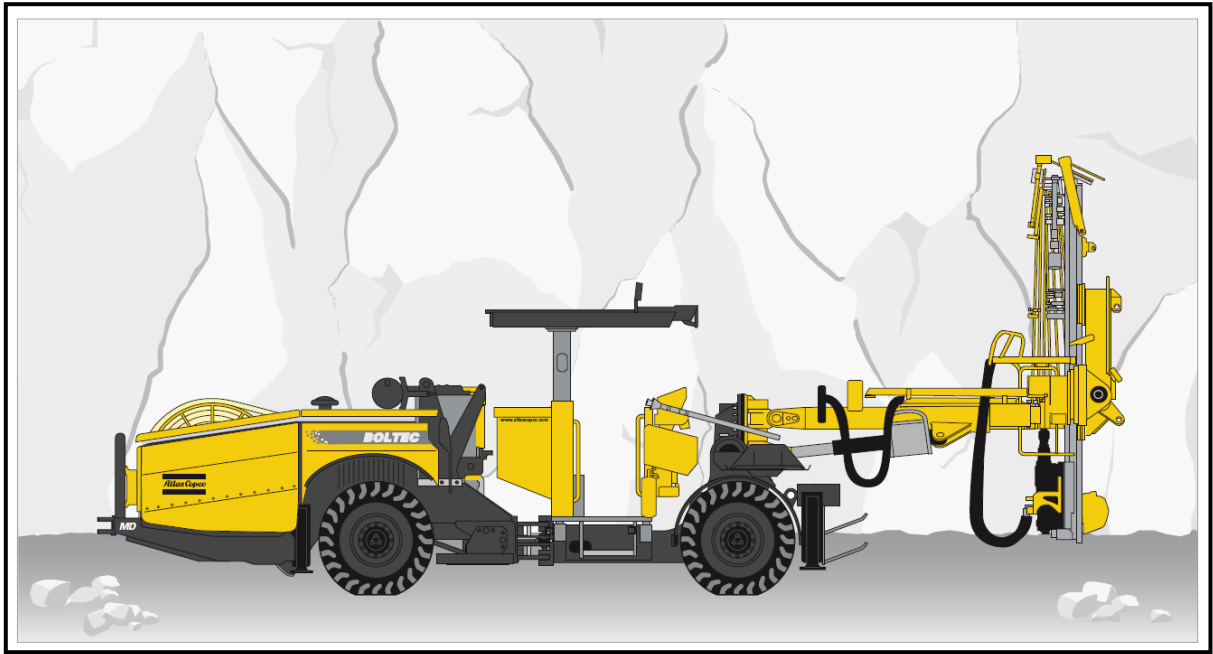


Figura 37: Jumbo empujador mecanizado.

➤ **LHD a control remoto**

Capacidad: 4,3 [m³].

De bajo perfil: Altura 2,3 [m]; Largo 9,3 [m].

Peso equipo 25 [ton].



Figura 38: Equipo LHD (Load – Haul – Dumper).

H. Infraestructura minera de Longacho

➤ Acceso principal

Largo: 2,5 [km] aprox.

Sección: 5 [m] de ancho x 5 [m] de alto

Uso: Acceso y salida.

Fortificación: Según requerimientos. Alternativas incluyen Perno grunteado y malla bischo. En sectores que lo requieran se cuenta con marcos de acero.



Figura 39: Acceso principal.

➤ Chimeneas de ventilación y evacuación

Longitud: 142 [m]; Diámetro: 3,1 [m]

Fortificada con perno y malla.

Anillos de acero en algunos tramos.

Tramos de escalera: cada 6 [m]

Descansos: 24

Uso: Salida de emergencia, ventilación, servicios mina.



Figura 40: Chimenea escalerada.

➤ **Comunicaciones**

Tipo señal: UHF

Transmisión: Cable radiante.

Longitud cable: 1.500 [m].

Cobertura: Mina Longacho (Canal 1) y superficie (Canal 6).

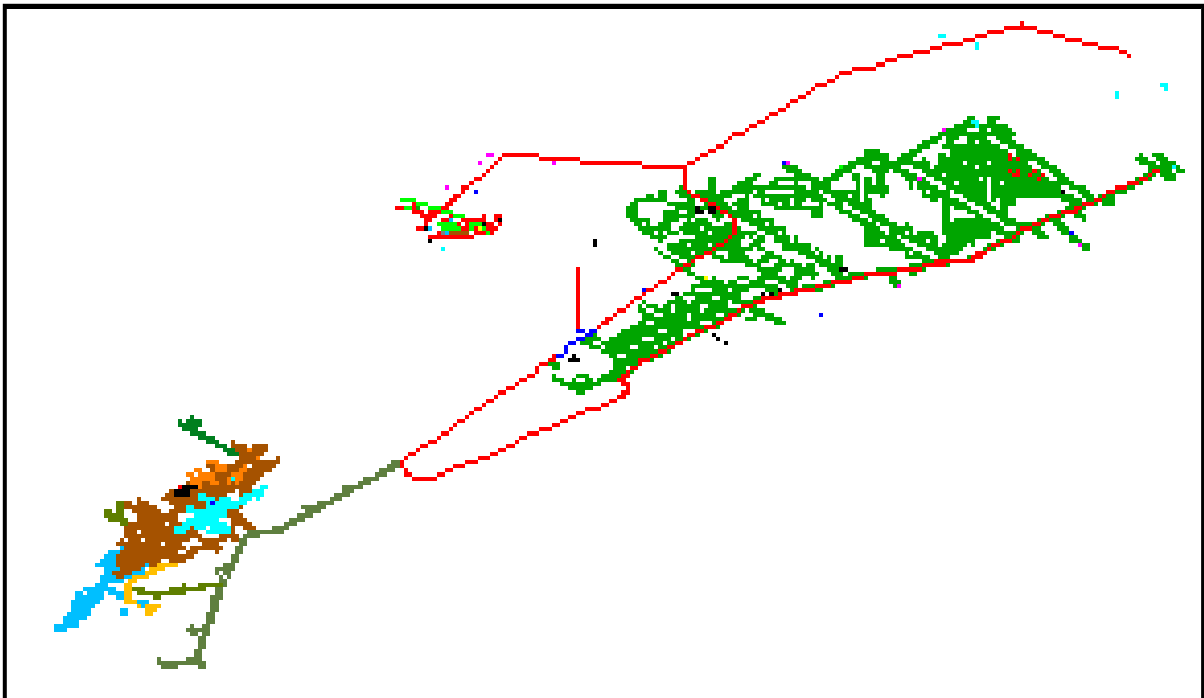


Figura 41: Comunicaciones por cable radiante.

I. Yacimiento Longacho

En las siguientes figuras se puede comparar la extensión del depósito exótico Longacho (lo reconocido y económicamente viable de ser extraído) contra la extracción desarrollada a la fecha.

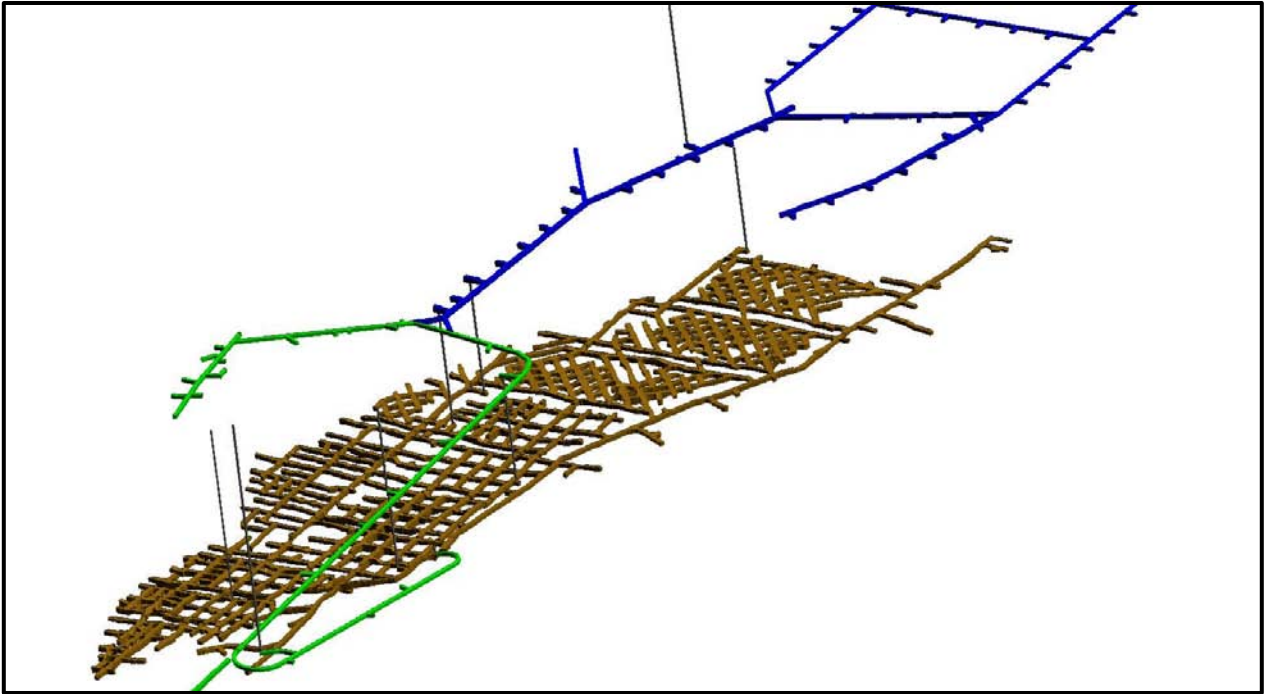


Figura 42: Vista isométrica de extracción desarrollada en Longacho.

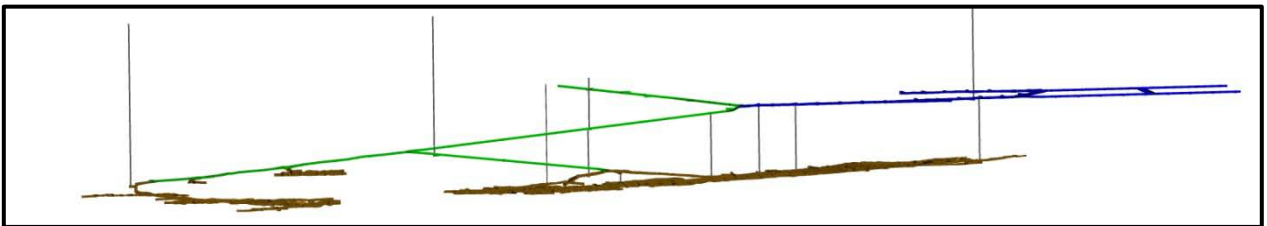


Figura 43: Vista lateral de extracción desarrollada en Longacho.

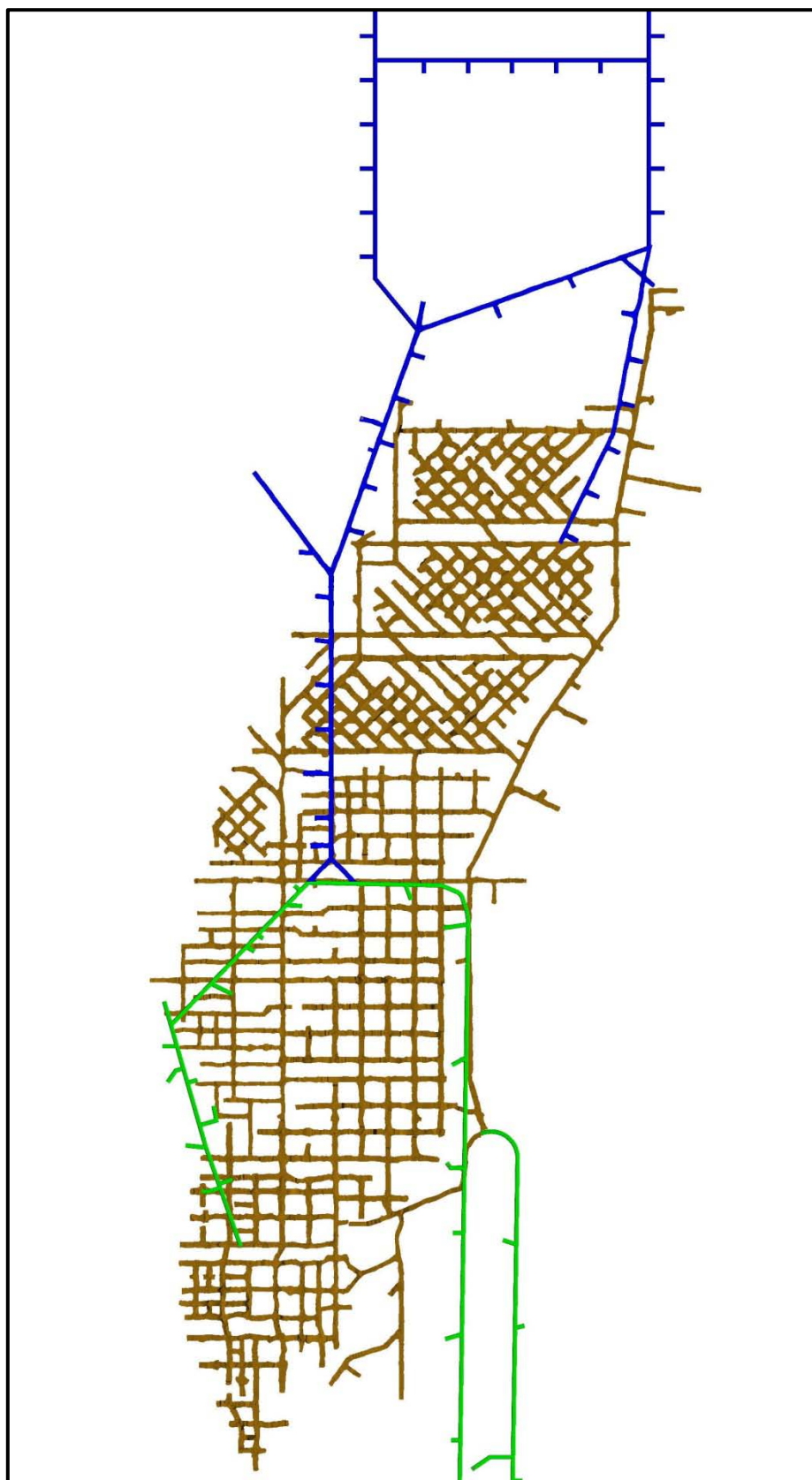


Figura 44: Vista en planta de extracción desarrollada en Longacho.

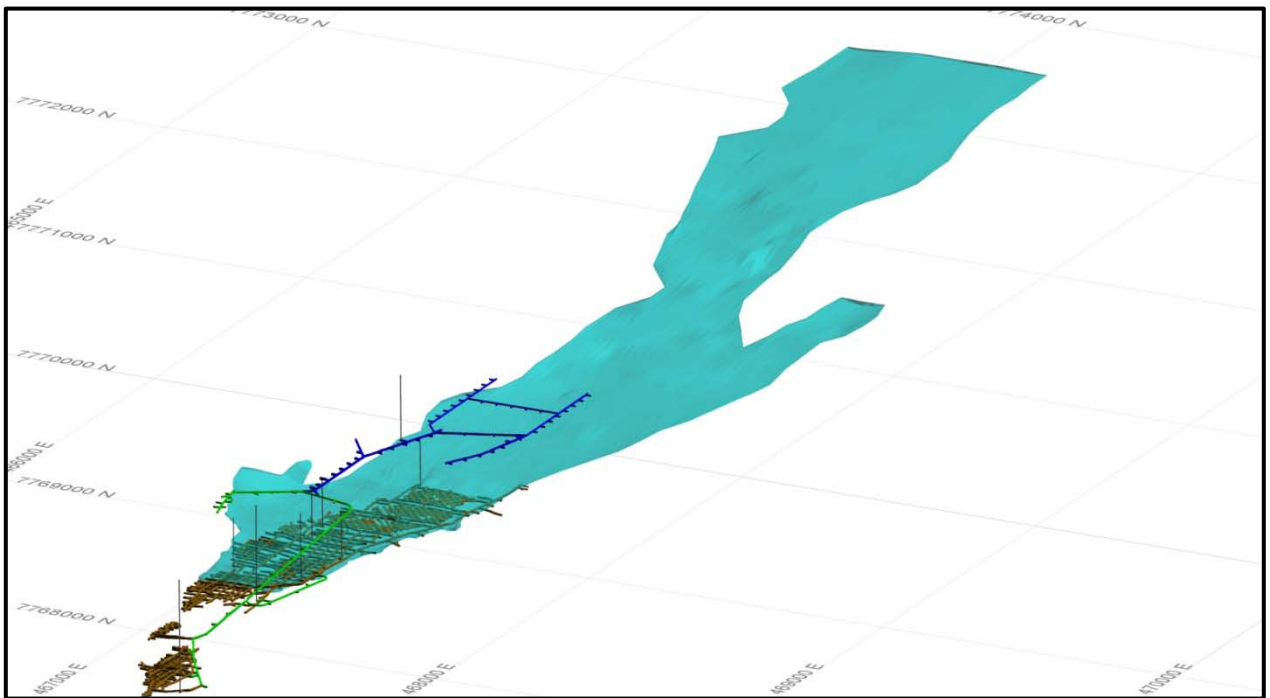


Figura 45: Vista isométrica de proyecto Longacho norte y desarrollos.

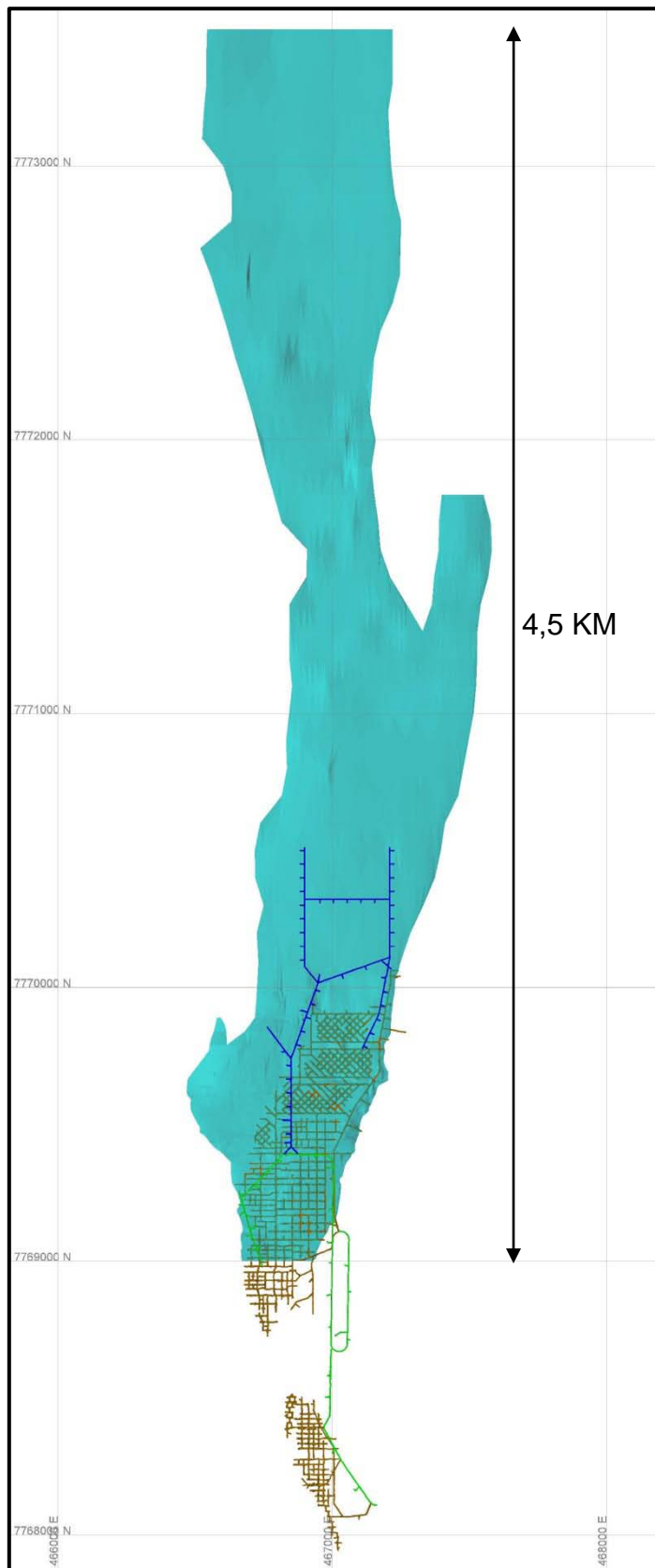


Figura 46: Vista en planta de proyecto Longacho norte y desarrollos.

J. Especies minerales

En la siguiente tabla, se presentan las especies minerales comunes en los yacimientos de cobre y sus características desde el punto de vista de la hidrometalurgia.

La clasificación se realiza según su importancia económica, agrupadas según su ubicación aproximada en el yacimiento y con su composición química más frecuente.

Tabla 8: Principales especies minerales de cobre.

Zona Mineralizada	Especie Mineralógica	Composición Más Frecuente Para Esta Especie	Cobre (%)
Zona oxidada secundaria	Cobre nativo	Cu°	100
	Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	57,5
	Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	55,3
	Chalcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25,5
	Brochantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	56,2
	Antlerita	$\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	53,7
	Atacamita	$3\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ó $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	59,5
	Crisocola ✦	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ó $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	36,2
	Dioptasa	$\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$	40,3
	Neotocita	$(\text{Cu}_i - \text{Fe}_j - \text{Mn}_k)\text{SiO}_3$	variable
	Cuprita	Cu_2O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Pitch / Limonita	$(\text{Fe}_i - \text{Cu}_j)\text{O}_2$	variable
	Delafosita	FeCuO_2	42,0
	Copper Wad ✦	CuMnO_2Fe	variable
Copper Pitch ✦	$\text{CuMn}_8\text{FeSiO}_2$	variable	
Zona de enriquecimiento secundario (o supérgeno)	Calcosina	Cu_2S	79,9
	Digenita	Cu_9S_5	78,1
	Djurleita	$\text{Cu}_{1,95-x}\text{S}$	variable
	Covelina	CuS	66,5
	Cobre nativo	Cu°	100
Zona primaria (o hipógena)	Calcopirita	CuFeS_2	34,6
	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4
	Tenantita	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	51,6
	Tetrahedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	45,8

✦ : Presentes en yacimiento Longacho.

K. Procesos posteriores a la extracción de mineral

➤ Chancado

El mineral desde la mina, debe ser reducido a un tamaño 100% bajo 3/8" para la lixiviación. Actualmente, la Planta de Chancado de la faena consta de 3 etapas, con la etapa final terciaria en circuito cerrado con harneros clasificadores.



Figura 47: Chancado.

➤ Aglomeración y Curado

El mineral chancado se aglomera al interior de un tambor rotatorio, con agua y ácido sulfúrico concentrado (98%). Aquí, el cobre es sometido a una disolución violenta y rápida, especialmente la fracción de cobre soluble.

Igual proceso de aglomeración, se ejecuta en los Ripios, originados de las operaciones anteriores de lixiviación entre los años 1972 y 2000.



Figura 48: Aglomeración y curado.

➤ Apilamiento

Los materiales aglomerados, mineral y ripios, se transportan en forma separadas a canchas de apilamiento, para su posterior tratamiento de Lixiviación. Esta separación,

se efectúa debido a las distintas condiciones metalúrgicas a las cuales serán sometidos, tales como: días de ciclo, dosificaciones de riego y consumo de ácido. Las canchas de apilamiento tienen su piso previamente compactado, impermeabilizado y dispuesto con tuberías de drenajes para evacuar las soluciones ricas de cobre (PLS), hacia las piscinas colectoras de soluciones.

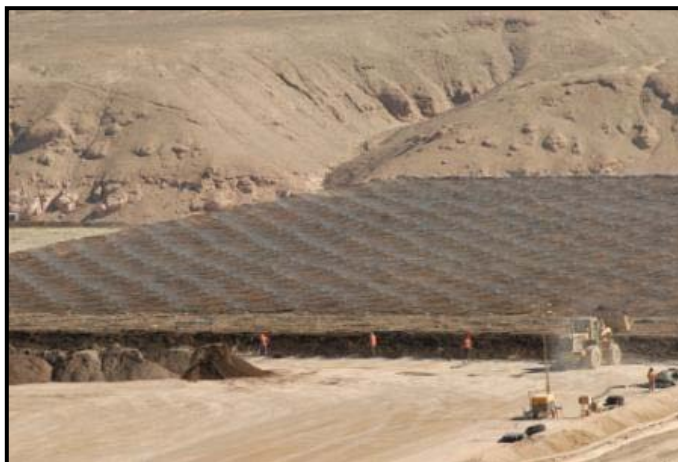


Figura 49: Apilamiento.

➤ **Lixiviación**

La solución refino de riego, es distribuida mediante aspersores de gota fina sobre las canchas de mineral y ripios. El ciclo de riego, es de aproximadamente de 14 días para los minerales y 10 días para ripios. El PLS ripio, es bombeado hacia la piscinas PLS de minerales, mezclándose ambas soluciones, para generar un PLS común de alimentación que es bombeada a la planta SX.



Figura 50: Lixiviación.

➤ **Extracción por Solventes (SX)**

En el proceso previo de lixiviación, se obtiene una solución enriquecida en cobre, pero, asimismo con muchas impurezas. El objetivo de la etapa de extracción por solventes, es generar una solución purificada sólo con cobre. Esta etapa, logra transferir selectivamente los iones de cobre desde la solución PLS hacia la solución

electrolítica rica en EW, mediante una solución orgánica, mezcla de solvente parafínico y un reactivo extractante. Este proceso se logra en un tren de SX, con dos etapas de extracción en serie E1 y E2, una etapa de lavado de orgánico L, y dos etapas de re-extracción en serie S1 y S2.



Figura 51: Extracción por solventes.

➤ **Electro-Obtención (EW)**

La nave EW de cobre, está diseñada para una producción nominal de 19.000 TMF Cu/año a partir de 92 celdas electrolíticas, mediante el sistema de láminas iniciales en celdas, llamadas partidoras. El ciclo de depositación de cobre es de 1 día para las láminas iniciales y de 7 días para los cátodos comerciales, obteniéndose al final de este ciclo, cátodos de cobre de un peso aproximado de 77 kilos cada uno.

La calidad catódica se ajusta a la norma LME Grado A (London Metal Exchange o Bolsa de Metales de Londres), obteniéndose cátodos con contenidos de impureza más bajos, que el límite máximo de dicha norma.



Figura 52: Electro-obtención.