



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL

ANÁLISIS DEL PROCESAMIENTO ÓPTIMO DE MINERALES  
INTERDIVISIONALES EN CONCENTRADORA CHUQUICAMATA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTION Y DIRECCION DE  
EMPRESAS

ESTEBAN ALEJANDRO RAMÍREZ OTAÍZA

PROFESOR GUIA:  
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN

MIEMBROS DE LA COMISION:  
WALTER CAZENAVE GUIER  
IVAN BRAGA CALDERÓN

SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2013

## Resumen

En el marco de la reestructuración organizacional que se ha llevado a cabo en la ex División Norte de Codelco, se hace necesario realizar una mirada distrital de la alimentación a las plantas concentradoras de la División Chuquicamata, esta mirada no debe tener solo en consideración los aspectos técnico-económicos sino que además debe tomar en cuenta temas estratégicos, ambientales y laborales.

El presente estudio conceptualiza la Vicepresidencia de Operaciones Norte como un Sistema, donde las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic son partes relevantes de éste, en cuyo desarrollo se utilizaron valores referenciales de envíos de mineral, leyes y recuperaciones con la finalidad de establecer un potencial caso de negocios que en una etapa posterior debe estudiarse en más detalle con los planes mineros y de producción reales del distrito.

Esta mirada integral cobra relevancia ya que la planta concentradora de Chuquicamata recibe minerales propios y provenientes de la División Radomiro Tomic, estos minerales poseen características diferentes desde el punto de vista de calidades, impurezas y comportamiento en las plantas de procesamiento existentes. En este contexto, el óptimo del sistema no es necesariamente igual a la suma de los óptimos locales, ya que al tener las plantas concentradoras una capacidad limitada y las Divisiones de alguna forma *compiten* por utilizarlas implica que el máximo de una va en desmedro de la otra por estar éstas interrelacionadas.

Este trabajo busca determinar el procesamiento óptimo en términos de la mejor distribución de alimentación a plantas de estos de minerales, considerando las variables estratégicas y ambientales que están involucradas, donde el efecto de sinergias encuentra las mayores potencialidades de desarrollo.

Para el presente estudio se buscó maximizar la función de beneficio utilizando herramientas que proporciona la investigación operativa como es la programación lineal. Adicionalmente se agregaron las restricciones correspondientes en términos productivos y ambientales para confeccionar el modelo.

En términos generales si la planificación se hiciera exclusivamente por cobre y molibdeno se tendería a maximizar el envío de Chuquicamata por tener mejores leyes que Radomiro Tomic, no obstante cuando se agregan restricciones ambientales como el Arsénico (As), la proporción de envío varía ya que los minerales de RT no poseen esta impureza y opera como un agente de dilución para cumplir con los estándares de comercialización de concentrados, por otra parte existen otras variables que juegan a favor de Radomiro Tomic, como son los proyectos de separación de líneas, que permite obtener un producto comercial y el proyecto quinto molino que aumenta la recuperación de Radomiro Tomic al agregar potencia adicional al sistema.

En general, de los resultados obtenidos se observa que existe un caso de negocios interesante al modificar el envío de minerales estipulado actualmente, donde existe un potencial de 100 millones de dólares de beneficio actualizado que se pueden capturar al tomar alguna opción que optimice la razón de alimentación a las plantas. Se concluye que existen los antecedentes para estudiar de manera más detallada el envío óptimo de minerales a las plantas concentradoras de Chuquicamata.

## Agradecimientos

En estas palabras quisiera agradecer a mi familia por el apoyo otorgado en todo este proceso y a la empresa CODELCO CHILE por darme la oportunidad de formar parte de este programa en especial a Enrique Chacón por la confianza y colaboración entregada.

## Tabla de contenido

1.0	Introducción .....	8
2.0	Descripción de la organización .....	8
3.0	Descripción del mercado.....	10
4.0	Contexto específico del tema de gestión.....	11
5.0	Descripción del tema.....	11
6.0	Objetivos del trabajo .....	13
7.0	Marco conceptual .....	13
8.0	Método(s) a utilizar en la solución del tema.....	16
8.1	Conjunto de datos .....	17
8.2	Conjunto de variables .....	23
8.2.1	Variables cuantitativas.....	23
8.2.2	Variables cualitativas .....	30
8.3	Restricciones.....	31
8.4	Función objetivo.....	32
9.0	Resultados.....	34
10.0	Conclusiones y recomendaciones .....	61
11.0	Bibliografía.....	63

## Tablas

Tabla 3.1: Proyección precio del Cobre .....	10
Tabla 3.2: Proyección precio Molibdeno .....	10
Tabla 3.3: Proyección precio Plata y Oro .....	10
Tabla 3.4: Proyección TC / RC.....	11
Tabla 8.1: Gastos chancado primario Chuquicamata en miles US\$ .....	19
Tabla 8.2: Gastos chancado primario Radomiro Tomic en miles US\$ .....	19
Tabla 8.3: Gastos concentradora Chuquicamata en miles US\$.....	21
Tabla 8.4: Precio venta cobre fino contenido en concentrado.....	22
Tabla 8.5: Precio venta molibdeno .....	23
Tabla 9.1: Datos generales caso base Chuquicamata .....	34
Tabla 9.2: Datos generales caso base Radomiro Tomic.....	35
Tabla 9.3: Resultados situación base.....	36
Tabla 9.4: Excedentes de concentrado situación base .....	37
Tabla 9.5: Datos generales caso libre Chuquicamata .....	37
Tabla 9.6: Datos generales caso libre Radomiro Tomic.....	38
Tabla 9.7: Emisiones corrida libre .....	38
Tabla 9.8: Resultados corrida libre.....	39
Tabla 9.9: Excedentes de concentrado corrida libre .....	40
Tabla 9.10: Datos generales Chuquicamata corrida igualando AsCo .....	41
Tabla 9.11: Datos generales Radomiro Tomic corrida igualando AsCo .....	41
Tabla 9.12: Resultados corrida igualando AsCo .....	42
Tabla 9.13: Excedentes de concentrado corrida igualando AsCo.....	43
Tabla 9.14: Datos generales Chuquicamata corrida quinto molino .....	44
Tabla 9.15: Datos generales Radomiro Tomic corrida quinto molino .....	44

Tabla 9.16: Resultados corrida quinto molino .....	45
Tabla 9.17: Excedentes de concentrado corrida quinto molino .....	46
Tabla 9.18: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación.....	46
Tabla 9.19: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación .....	47
Tabla 9.20: Resultados sensibilización recuperación.....	48
Tabla 9.21: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación .....	48
Tabla 9.22: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida libre .	49
Tabla 9.23: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida libre .....	49
Tabla 9.24: Resultados sensibilización recuperación corrida libre .....	50
Tabla 9.25: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación corrida libre .....	51
Tabla 9.26: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida igualando AsCo .....	51
Tabla 9.27: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida igualando AsCo .....	52
Tabla 9.28: Resultados sensibilización recuperación corrida igualando AsCo.....	53
Tabla 9.29: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación corrida igualando AsCo .....	53
Tabla 9.30: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida quinto molino.....	54
Tabla 9.31: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida quinto molino .....	54
Tabla 9.32: Resultados sensibilización recuperación corrida quinto molino.....	55
Tabla 9.33: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación corrida quinto molino.....	56
Tabla 9.34: Tabla resumen de simulaciones con recuperación planificada .....	56
Tabla 9.35: Tabla resumen de simulaciones con disminución de recuperación.....	56

Tabla 9.36: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida quinto molino, límite 80 kt/d en capacidad correa .....	58
Tabla 9.37: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida quinto molino, límite 80 kt/d en capacidad correa .....	58
Tabla 9.38: Resultados sensibilización recuperación corrida quinto molino, límite 80 kt/d en capacidad correa.....	59
Tabla 9.39: Proporción de gasto fijo.....	59
Tabla 9.40: Datos generales Chuquicamata sensibilización razón de gasto fijo-variable .....	60
Tabla 9.41: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización razón de gasto fijo-variable .....	60
Tabla 9.42: Resultados sensibilización razón gasto fijo-variable.....	61

## Ilustraciones

Ilustración 2.1: Ubicación geográfica mina Chuquicamata .....	9
Ilustración 5.1: Diagrama general de operación sulfuros Sub-distrito El Loa .....	12
Ilustración 7.1: Diagrama general de sistema Sub-distrito El Loa .....	14
Ilustración 7.2: Curvas de ingresos y costos totales.....	15
Ilustración 8.1: Diagrama de Bloques proceso de optimización .....	17
Ilustración 8.2: Gráfico de producción situación base .....	18
Ilustración 8.3: Operaciones unitarias concentradora .....	20
Ilustración 8.4: Gráfico ley de Cobre .....	24
Ilustración 8.5: Gráfico ley de Molibdeno .....	25
Ilustración 8.6: Gráfico ley de Arsénico .....	26
Ilustración 8.7: Gráfico recuperación de Cobre .....	27
Ilustración 8.8: Gráfico recuperación de Molibdeno .....	28
Ilustración 8.9: Gráfico costo unitario chancado primario .....	29
Ilustración 8.10: Gráfico efecto de la variable sobre el tratamiento de Chuquicamata ...	30
Ilustración 9.1: Solución gráfica.....	57



## **1.0 Introducción**

En el marco de la reestructuración organizacional que se ha llevado a cabo en la ex División Norte de Codelco, se hace necesario realizar una mirada distrital de la alimentación a las plantas concentradoras de la División Chuquicamata, esta mirada no solo debe tener en consideración los aspectos técnico-económicos sino que además debe tomar en cuenta temas estratégicos, ambientales y laborales.

Esta mirada integral cobra relevancia cuando la planta concentradora de Chuquicamata recibe minerales propios y provenientes de la División Radomiro Tomic, estos minerales poseen características diferentes desde el punto de vista de calidades, impurezas y comportamiento en las plantas de procesamiento existentes.

Este trabajo busca determinar el procesamiento óptimo, en términos de la mejor distribución de alimentación plantas de estos de minerales, considerando las variables estratégicas y ambientales que están involucradas.

## **2.0 Descripción de la organización**

Ubicada en la II Región, la División Norte de Codelco fue creada el 1 de agosto de 2002, a través de la fusión de las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic.

En el año 2010 la División Norte se reestructura en la Vicepresidencia de Operaciones Norte (VON) que engloba las siguientes Divisiones:

- División Chuquicamata (DCH)
- División Radomiro Tomic (DRT)
- División Salvador (DSAL), que posteriormente pasa a formar parte de la Vicepresidencia de Operaciones Sur
- División Ministro Hales (DMH)
- Minera Gaby S.A.

Para el caso de este estudio cuando se hable de Subdistrito el Loa, se refiere a la interacción de las siguientes Divisiones:

- División Chuquicamata
- División Radomiro Tomic
- División Ministro Hales

La División Chuquicamata está ubicado a 1.650 kilómetros al norte de la capital de Chile y a 250 kilómetros al noreste de Antofagasta, a 2.870 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con dos minas que utilizan el tipo de explotación a rajo abierto, "Chuquicamata" y "Mina Sur". Chuquicamata entró en operaciones en 1910, aunque sus propiedades mineras también eran conocidas desde hace siglos por culturas prehispánicas.

La producción de Chuquicamata es de unas 528.377 toneladas de cátodos electrorefinados y electroobtenidos con una pureza de 99,99 por ciento de cobre. También produce unas 10.760 toneladas métricas de contenido fino de molibdeno. Además, se obtienen otros subproductos, como barros anódicos y ácido sulfúrico.

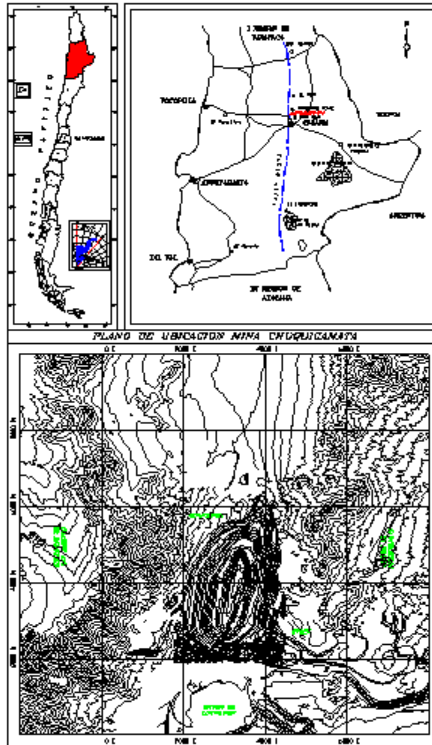


Ilustración 2.1: Ubicación geográfica mina Chuquicamata

El desarrollo de este trabajo se enfoca en el negocio de concentración de sulfuros de la División Chuquicamata, que es el encargado de procesar minerales de la Mina Chuquicamata y de la Mina Radomiro Tomic, ésta última que es capaz de alimentar la planta concentradora de Chuquicamata por medio de un sistema de Chancado y correa con una capacidad de 100.000 t/d

La División Chuquicamata cuenta con tres plantas concentradoras:

- A-0: molienda convencional que data de la década del 50 y tiene una capacidad de 70.000 t/d.
- A-1: molienda convencional que data de la década del 70 y tiene una capacidad de 34.000 t/d.
- A-2: molienda semi autógena planta que empieza a operar a fines de la década del 80 y tiene una capacidad de 78.000 t/d.

En total las plantas concentradoras de Chuquicamata tienen una capacidad de 182.000 t/d.

Adicionalmente Chuquicamata cuenta con una Fundición cuyo proyecto de optimización busca potenciar el horno Flash, de modo que se logre una capacidad de fusión 1.400.000 toneladas de concentrado al año. Este tema es relevante ya que de esta capacidad depende si existen o no excedentes de concentrados.

### 3.0 Descripción del mercado

Las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic presentes en este estudio, como producto principal producen cátodos de cobre de alta pureza, en el marco de este trabajo dado que las fundiciones tienen una capacidad limitada y la estrategia de la corporación establece que los concentrados y calcinas provenientes de la División Ministro Hales (DMH) tienen prioridad en la alimentación de la fundición de Chuquicamata se presentan excedentes de concentrados Chuquicamata – Radomiro Tomic, si estos concentrados no pueden ser procesados en las fundiciones de la Corporación (Chuquicamata y Potrerillos) éstos deben cumplir las exigencias de calidad que detallan las Orientaciones Comerciales de la Corporación para poder ser comercializados.

Las Orientaciones Comerciales establecen indicadores sobre los cuales se realizan las evaluaciones económicas de la corporación. A continuación se presentan tablas con los principales parámetros económicos considerados.

Cobre cUS\$/lb	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Largo plazo
Nivel Superior	411	396	370	358	354	345	327
Nivel Medio	398	367	325	306	300	291	275
Nivel inferior	385	339	282	257	250	242	227

Tabla 3.1: Proyección precio del Cobre

Un factor importante y diferenciador de los minerales de Chuquicamata y Radomiro Tomic es su contenido de Molibdeno por lo que se hace necesario considerarlo en las evaluaciones.

Precio US\$/kg	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Largo plazo
Molibdeno	31	30	32	25	25	30	30

Tabla 3.2: Proyección precio Molibdeno

Para el caso de la valorización de los concentrados cobran importancia los cargos de tratamiento, cargos de refinación y los créditos por subproductos como son la plata y oro, a continuación se presenta una tabla con la proyección de estos indicadores.

Precio US\$/ozt	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Largo plazo
Plata	33,2	29,0	24,4	20,0	16,3	15,4	15,4
Oro	1.769	1.720	1.480	1.348	1.126	962	962

Tabla 3.3: Proyección precio Plata y Oro

TC /RC	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Largo plazo
--------	------	------	------	------	------	------	-------------

TC, US\$/tm	65	65	70	90	110	125	125
RC, cUS\$/lb	6,5	6,5	7,0	9,0	11,0	12,5	12,5

Tabla 3.4: Proyección TC / RC

Desde el punto de vista de las penalidades por Arsénico (As), el máximo contenido de esta impureza aceptada por las fundiciones externas es de 0,5% de As en concentrado, sobre este valor no hay mercado disponible en términos de las orientaciones comerciales de la corporación.

Por otro lado, después de las transferencias interdivisionales se estima una capacidad máxima del mercado para absorber ventas de 600.000 toneladas, sin afectar los términos de estas orientaciones comerciales. Disponibilidades sobre las consignadas, implicarían la necesidad de reformular los términos comerciales.

#### 4.0 Contexto específico del tema de gestión

En el contexto de Divisiones independientes, cada una busca maximizar el beneficio de su negocio, no obstante la mirada distrital no pretende determinar el máximo beneficio local sino el máximo beneficio integrado, este máximo no solo contempla la condición económica, sino que además considera las siguientes variables:

- Calidad de mineral: un mineral de Chuquicamata que tiene mejores leyes y recuperaciones versus un mineral de Radomiro Tomic que posee mejor comportamiento en alguna de las plantas concentradoras (molienda convencional).
- Ambientales: debido a las impurezas presentes en el concentrado Chuquicamata versus un concentrado de Radomiro Tomic exento de éstas.
- Estratégicas: desde el punto de vista del uso eficiente de los activos ya que la mezcla de ambos minerales permite llenar la capacidad de plantas concentradoras, además que permite el desarrollo de las fases de sulfuros de Radomiro Tomic a la espera de la puesta en marcha del Proyecto Sulfuros de RT Fase II que considera una planta concentradora de 200 kt/d de capacidad.
- Laborales: esta variable debe ser considerada ya que si bien en las instalaciones de la División Chuquicamata se procesan actualmente minerales de Radomiro Tomic, un mayor envío de estos podría significar considerar plantas exclusivas para este mineral por lo que se deberían considerar convenios de desempeños de los trabajadores con indicadores diferenciados puesto que los minerales tienen comportamiento diferentes en las plantas concentradoras.

#### 5.0 Descripción del tema

La reestructuración organizacional de la División Norte de Codelco en Divisiones independientes hace que cada una de éstas sea medida sobre la base de sus indicadores propios por lo que resulta lógico que las Divisiones busquen maximizar su VAN individual.

A su vez todas estas divisiones del distrito norte están bajo la Vicepresidencia de Operaciones Norte y es Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo Distrital la encargada de determinar la configuración de proyectos a implementar que maximicen el valor del negocio integrado.

Este trabajo aborda la problemática que se genera cuando minerales provenientes de distintas Divisiones comparten plantas y puede significar el desplazamiento de mineral del dueño de la planta en busca de un máximo global y no local, estas consideraciones se deben abordar no sólo desde un punto de vista técnico-económico sino que además tomando en cuenta variables estratégicas, ambientales, laborales entre otras.

En la siguiente ilustración se aprecia de manera esquemática la integración de las Divisiones del Subdistrito El Loa, en términos de las plantas que comparten siendo éstas de la División Chuquicamata.

Se observa como las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic comparten las plantas concentradoras, fundición y refinería. A su vez la División Ministro Hales por decisión estratégica a nivel corporativo tiene prioridad de utilizar la Fundición de Chuquicamata para fundir sus calcinas y concentrados.

El alcance de este trabajo se enfocará a la interacción de las Divisiones Chuquicamata – Radomiro Tomic en las plantas concentradoras como se observa en el recuadro con línea segmentada.

El horizonte de evaluación se centrará en el quinquenio 2013-2017.

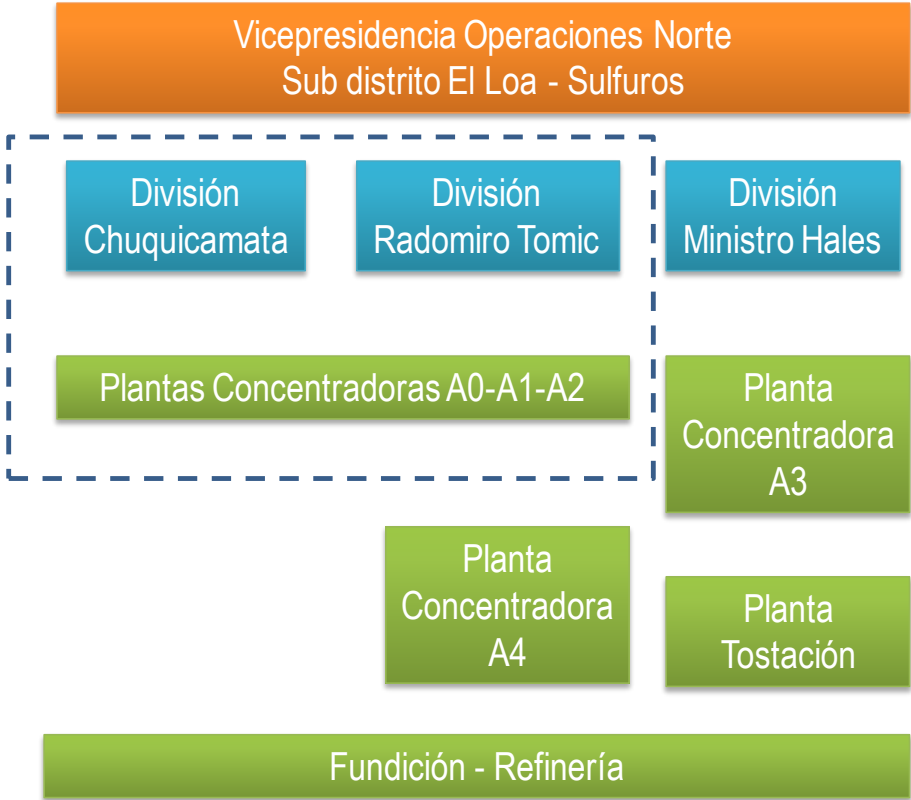


Ilustración 5.1: Diagrama general de operación sulfuros Sub-distrito El Loa

Basado en lo anterior una de las preguntas frecuentes a nivel Divisional y Distrital es ¿cuál es la mezcla óptima de minerales Chuquicamata – RT que alimentan las plantas concentradoras?, este estudio busca responder esta consulta pero considerando variables adicionales a las netamente económicas.

Un hecho importante a considerar es que existe una inversión hundida de chancador y sistema de transporte desde Radomiro Tomic a las plantas concentradoras de Chuquicamata con una capacidad de 100.000 toneladas por día, este dato entrega una primera restricción de capacidad de envío, por otro lado se consideran los desarrollos de fases que nos debiesen entregar límites inferiores para no hipotecar el futuro por una decisión de corto plazo.

A su vez existen decisiones estratégicas como es desplazar un mineral en función de otro para viabilizar una cartera de productos y el uso eficiente de los activos. Desde el punto de vista ambiental los productos generados deben cumplir con los lineamientos ambientales de la corporación, en este ámbito los minerales de Chuquicamata y Radomiro Tomic tienen grandes diferencias en términos de impurezas por lo que es importante analizar este aspecto. En el tema laboral, los minerales de las diferentes divisiones también tienen distinto comportamiento metalúrgico, por lo que se deben analizar los convenios de desempeño de los trabajadores y sensibilizar a este estamento sobre la base de las mejores decisiones para la corporación.

Estas variables y restricciones se analizarán con mayor detalle en los capítulos de marco conceptual y metodología.

En definitiva, se busca mediante un análisis técnico-económico–estratégico estudiar las posibles alternativas que maximizan el beneficio distrital en términos de la alimentación a las plantas concentradoras existentes.

## **6.0 Objetivos del trabajo**

El objetivo principal de este trabajo consiste en:

- Determinar el procesamiento óptimo de minerales Chuquicamata-Radomiro Tomic en las plantas concentradoras de Chuquicamata que maximizan el beneficio distrital considerando variables ambientales, productivas, económicas y estratégicas.

El planteamiento de este objetivo busca sobre la base de una evaluación económica integrada y utilizando herramientas como la programación lineal plantear las restricciones necesarias que permitan cuantificar el procesamiento de minerales de cada división involucrada, además se tomarán en cuenta temas estratégicos que se analizarán de forma cualitativa en el caso de no poder cuantificarlos.

## **7.0 Marco conceptual**

El presente estudio conceptualiza el Subdistrito El Loa de la Vicepresidencia de Operaciones Norte como un Sistema, donde las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic son partes relevantes de éste, como se observa en la ilustración 7.1

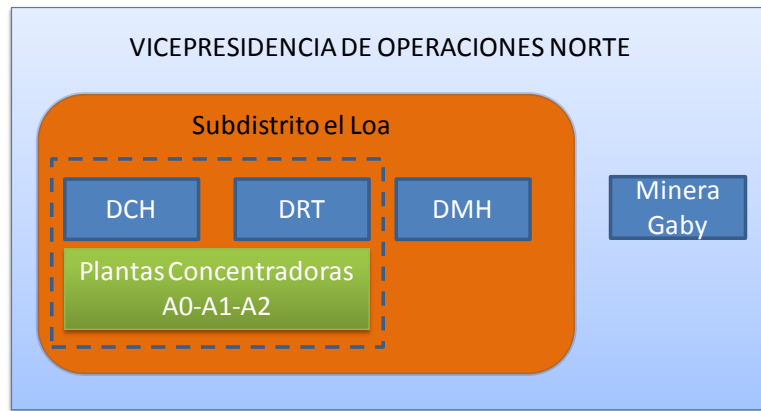


Ilustración 7.1: Diagrama general de sistema Sub-distrito El Loa

En este contexto, el óptimo del sistema no es necesariamente igual a la suma de los óptimos locales, en este caso los óptimos de las Divisiones Chuquicamata-RT, ya que al tener las plantas una capacidad limitada y las Divisiones de alguna forma *compiten* por utilizarlas implica que el máximo de una va en desmedro de la otra por estar interrelacionadas.

Lo que se busca es determinar el óptimo del sistema del subdistrito El Loa y es donde el efecto de sinergias encuentra las mayores potencialidades de desarrollo, pero se hace necesario alcanzar en primeras etapas los máximos individuales de las organizaciones para poder entonces proceder a la integración armónica de los mismos.

El problema que se plantea en los objetivos de este trabajo tiene relación con la producción que envían a las plantas concentradoras las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic. La decisión básica que debe tomarse a nivel *distrital* responde a la pregunta ¿cuánto envía cada división a las plantas concentradoras? En términos generales y como primera aproximación, la respuesta a esta pregunta está relacionada con las orientaciones comerciales de la corporación, principalmente el precio del Cobre y subproductos principales como el Molibdeno, que determinan en gran medida los ingresos de la empresa y con el costo de producción de concentrado.

Por ello, lo que se busca es maximizar el beneficio.

$$\text{Beneficio} = \text{Ingresos Totales} - \text{Costos Totales}$$

Los beneficios son máximos cuando se alcanza la máxima diferencia entre los ingresos totales y los costos totales.

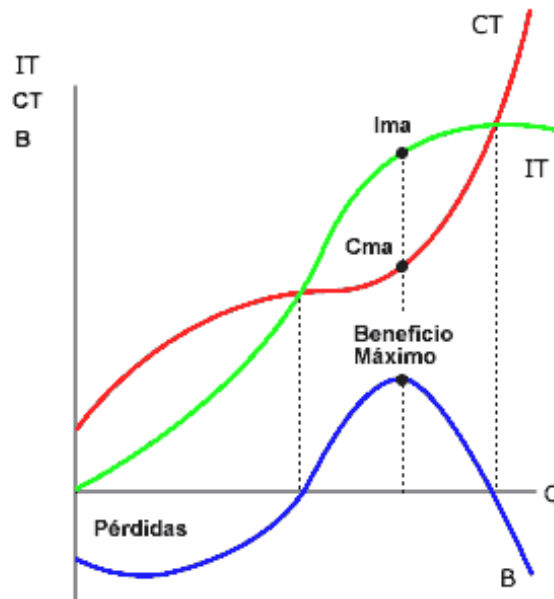


Ilustración 7.2: Curvas de ingresos y costos totales

Como se puede ver en la Ilustración 7.2, la diferencia positiva máxima entre los ingresos totales y los costos totales se alcanza en el punto en el que la pendiente de la curva de ingresos totales es igual a la pendiente de la curva de costos totales. Dado que la pendiente de una curva mide el cambio experimentado por la variable dependiente (costos totales, ingresos totales) cuando cambia la variable independiente (producción), lo que estamos diciendo es que el costo marginal debe ser igual al ingreso marginal para que los beneficios sean máximos.

Para este caso buscaremos maximizar la función de beneficio utilizando herramientas que proporciona la investigación operativa como es la programación lineal.

La programación matemática es una potente técnica de modelado usada en el proceso de toma de decisiones. Cuando se trata de resolver un problema de este tipo es recomendable definir claramente las etapas presentes en su resolución.

La primera etapa consiste en identificar las posibles decisiones que pueden tomarse; esto lleva a identificar las variables del problema concreto. Normalmente, las variables son de carácter cuantitativo y se buscan los valores que optimizan el objetivo.

La segunda etapa supone determinar qué decisiones resultan admisibles; esto conduce a un conjunto de restricciones que se determinan teniendo presente la naturaleza del problema en cuestión.

En la tercera etapa, se calcula el beneficio asociado a cada decisión admisible; esto supone determinar una función objetivo que asigna a cada conjunto posible de valores para las variables que determinan una decisión. El conjunto de todos estos elementos define el problema de optimización.

Si bien un elemento principal de la investigación de operaciones es el modelamiento matemático y aunque la solución de este modelo establece la base para la toma de decisiones, se deben considerar factores intangibles o no cuantificables, por ejemplo las



relaciones laborales, estrategia de la empresa, entre otras para poder llegar a la decisión final, por lo que la solución del problema no necesariamente corresponde al óptimo matemático sino más bien a una solución dentro del espacio factible.

## **8.0 Método(s) a utilizar en la solución del tema**

En la investigación de operaciones no se tiene una sola técnica general con la que se resuelvan todos los modelos matemáticos que surgen. En lugar de ello la clase y complejidad del problema determina la naturaleza del método de solución.

Para nuestro caso se utilizará el método de la programación lineal que se diseña para modelos con funciones objetivos y restricciones estrictamente lineales.

Se hace notar que cualquier problema de programación lineal requiere identificar cuatro componentes básicos:

1. El conjunto de datos.
2. El conjunto de variables involucradas en el problema, junto con sus dominios respectivos de definición.
3. El conjunto de restricciones lineales del problema que definen el conjunto de soluciones admisibles.
4. La función lineal que debe ser optimizada (minimizada o maximizada)

El desarrollo de este trabajo busca seguir una secuencia lógica tanto en la búsqueda de información para obtener los datos iniciales como en el desarrollo propiamente tal del estudio.

Para ello se procede a desarrollar los componentes básicos de la programación lineal.

Primero la recolección de información y datos iniciales, para este caso se necesitan planes mineros y se utilizará como base el Plan de Negocios y Desarrollo 2012, no obstante los valores utilizados corresponden a datos referenciales que dan cuenta de tratamientos en plantas concentradoras, leyes de Cobre, Molibdeno y Arsénico, así como sus recuperaciones y parámetros metalúrgicos, tanto para Chuquicamata como para Radomiro Tomic.

Adicionalmente se obtendrán del mismo plan de negocios datos referenciales de los costos asociados a las plantas y minas de las Divisiones involucradas.

Segundo, la identificación de variables claves que para este caso las producciones de las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic cumplen este rol, puesto que la variación de ellas determinarán el óptimo de la función objetivo.

Tercero, la determinación de las restricciones que definen el espacio factible de las soluciones, en este estudio se tienen restricciones de capacidad de plantas, restricciones de capacidad de transporte, restricciones ambientales, etc.

Cuarto, la definición de la función objetivo a optimizar, en este estudio se empezará optimizando la función beneficio para posteriormente ir incluyendo el análisis de los temas ambientales en la solución, así como aquellos más difícilmente cuantificables como son la estrategia y las relaciones laborales entre otros.

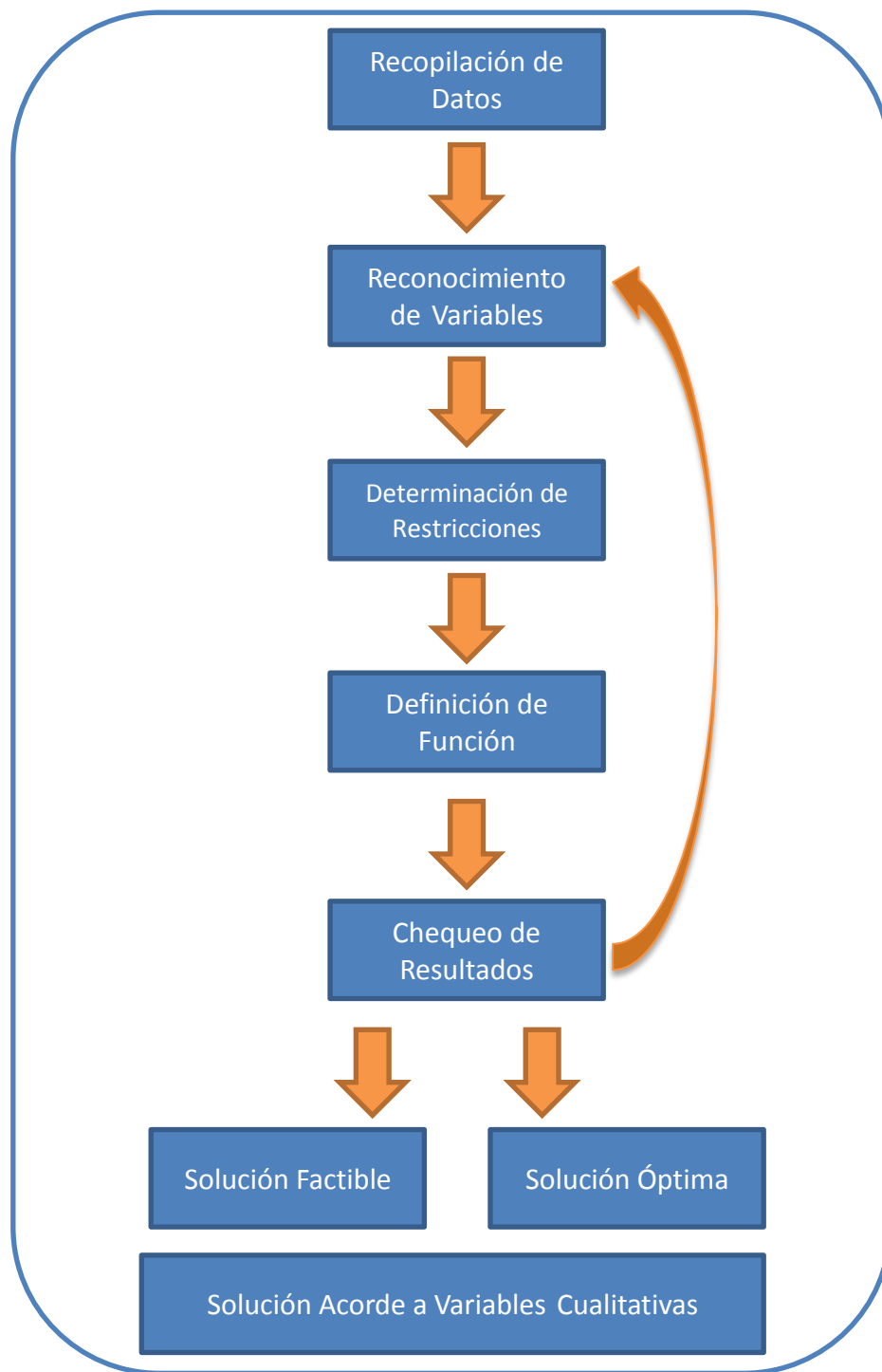


Ilustración 8.1: Diagrama de Bloques proceso de optimización

### 8.1 Conjunto de datos

Para este estudio se utilizaron valores referenciales de envíos, leyes y recuperaciones con la finalidad de establecer un potencial caso de negocios que en una etapa posterior

debe estudiarse en más detalle con los planes mineros y de producción reales del distrito.

La base de costos y envíos de mineral de la situación referente están basados en el Plan de Negocios vigente (PND 2012), como se muestra en la siguiente figura, para el caso de la situación base las producción de Chuquicamata y Radomiro Tomic en el quinquenio son de 122 kt/d y 60 kt/d respectivamente, esta proporción es la que se pretende revisar en este estudio en busca de maximizar el beneficio distrital.

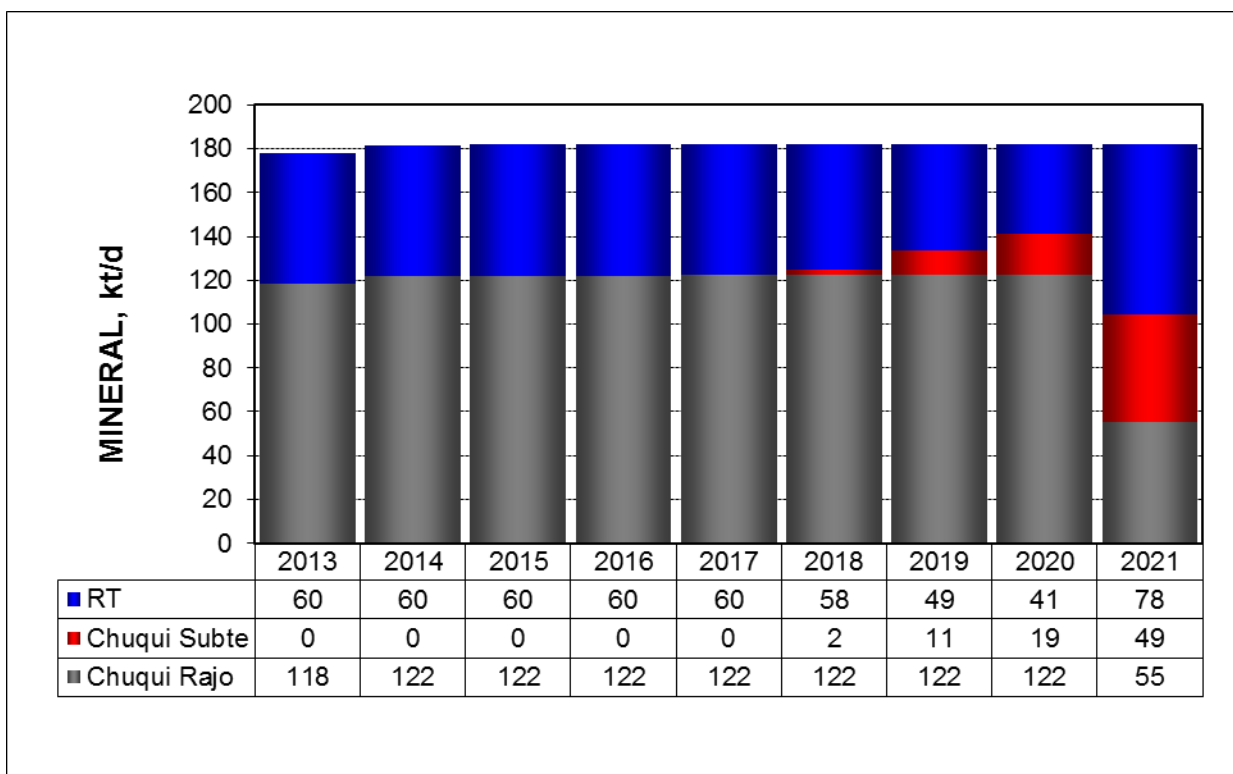


Ilustración 8.2: Gráfico de producción situación base

Los gastos asociados a este plan son obtenidos del sistema corporativo de evaluación de planes de negocio, bajo este esquema se determinan los costos unitarios de Chuquicamata y Radomiro Tomic por operaciones unitarias, y de esta manera obtener la diferenciación de gastos de las dos Divisiones. La metodología consistió en obtener dotaciones, relaciones insumo-producto y gastos fijos por elemento de gasto con la finalidad de tener parametrizadas todas las operaciones unitarias involucradas en el sistema.

Si bien los minerales provenientes de Chuquicamata y Radomiro Tomic alimentan a la misma planta concentradora, el proceso de chancado primario y sistema de transporte son independientes, traduciéndose en una de las diferencias de gastos importantes para estos minerales, que para el caso de la División Chuquicamata es bastante más caro que el de la División Radomiro Tomic, esta diferencia se aprecia en las tablas que se muestran a continuación.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Remuneraciones</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>	<b>16,353</b>
Rol A	1,699	1,699	1,699	1,699	1,699	1,699	1,699	1,699	1,699
Rol B	14,654	14,654	14,654	14,654	14,654	14,654	14,654	14,654	14,654
<b>Materiales</b>	<b>20,582</b>	<b>21,032</b>	<b>20,618</b>	<b>20,694</b>	<b>20,907</b>	<b>20,690</b>	<b>20,633</b>	<b>20,629</b>	<b>12,814</b>
Otros Materiales	20,582	21,032	20,618	20,694	20,907	20,690	20,633	20,629	12,814
<b>Combustibles</b>	<b>121</b>	<b>121</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>119</b>	<b>118</b>	<b>118</b>	<b>118</b>	<b>118</b>
Otros Combustibles	121	121	120	120	119	118	118	118	118
<b>Servicios de Terceros</b>	<b>18,773</b>	<b>19,249</b>	<b>19,026</b>	<b>19,097</b>	<b>19,568</b>	<b>19,097</b>	<b>19,104</b>	<b>19,098</b>	<b>8,637</b>
Otros Servicios	18,773	19,249	19,026	19,097	19,568	19,097	19,104	19,098	8,637
<b>Suministros</b>	<b>18,989</b>	<b>19,340</b>	<b>19,348</b>	<b>19,370</b>	<b>19,632</b>	<b>19,580</b>	<b>19,577</b>	<b>19,635</b>	<b>16,232</b>
Energía	3,649	3,677	3,624	3,411	3,411	3,411	3,413	3,421	1,543
Potencia	10,078	10,311	10,416	10,639	10,835	10,835	10,835	10,881	10,881
Otros	5,262	5,352	5,308	5,319	5,386	5,334	5,330	5,333	3,809
<b>Otros</b>	<b>19,067</b>	<b>19,392</b>	<b>19,232</b>	<b>19,275</b>	<b>19,515</b>	<b>19,326</b>	<b>19,313</b>	<b>19,325</b>	<b>13,801</b>
Mantenición	19,067	19,392	19,232	19,275	19,515	19,326	19,313	19,325	13,801
<b>Total</b>	<b>93,885</b>	<b>95,486</b>	<b>94,697</b>	<b>94,909</b>	<b>96,094</b>	<b>95,164</b>	<b>95,098</b>	<b>95,159</b>	<b>67,955</b>

Tabla 8.1: Gastos chancado primario Chuquicamata en miles US\$

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Remuneraciones</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>	<b>1,319</b>
Rol A	360	360	360	360	360	360	360	360	360
Rol B	959	959	959	959	959	959	959	959	959
<b>Materiales</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>
Otros Materiales	15	15	15	15	15	15	15	15	15
<b>Combustibles</b>	<b>53</b>	<b>53</b>	<b>53</b>	<b>53</b>	<b>53</b>	<b>53</b>	<b>53</b>	<b>53</b>	<b>53</b>
Otros Combustibles	53	53	53	53	53	53	53	53	53
<b>Servicios de Terceros</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>459</b>	<b>459</b>
Otros Servicios	459	459	459	459	459	459	459	459	459
<b>Suministros</b>	<b>2,497</b>	<b>2,538</b>	<b>2,522</b>	<b>2,457</b>	<b>2,522</b>	<b>2,470</b>	<b>2,275</b>	<b>2,110</b>	<b>2,917</b>
Energía	984	962	946	988	1,319	1,266	1,072	906	1,713
Potencia	914	975	976	869	604	604	604	604	604
Otros	600	600	600	600	600	600	600	600	600
<b>Otros</b>	<b>12,707</b>	<b>12,744</b>	<b>12,744</b>	<b>12,779</b>	<b>12,743</b>	<b>12,239</b>	<b>10,356</b>	<b>8,758</b>	<b>16,558</b>
Mantenición	12,707	12,744	12,744	12,779	12,743	12,239	10,356	8,758	16,558
<b>Total</b>	<b>17,050</b>	<b>17,128</b>	<b>17,112</b>	<b>17,083</b>	<b>17,112</b>	<b>16,555</b>	<b>14,478</b>	<b>12,714</b>	<b>21,321</b>

Tabla 8.2: Gastos chancado primario Radomiro Tomic en miles US\$

La concentradora es una operación común para los minerales de Chuquicamata y Radomiro Tomic, si bien pudiese existir una diferencia de gastos al ingresar un mineral por la línea semiautógena o convencional de la planta, para este estudio se consideró que el costo en concentradora es el mismo para los minerales de las Divisiones en cuestión.

En el diagrama de bloques de la concentradora que se muestra a continuación se observan las tres secciones de molienda de las cuales dos corresponden a molienda convencional (plantas A0 y A1) y una a planta semiautógena (planta A2), con esta

última se evita la operación unitaria de chancado secundario terciario que si necesitan las plantas convencionales.

Adicionalmente diagrama de la concentradora muestra en bloques de color azul aquellas operaciones unitarias cuyos flujos de alimentación son independientes para cada planta, no así los bloques verdes que reflejan las operaciones unitarias cuyos flujos son mezclados y no se puede diferenciar el origen del mineral.

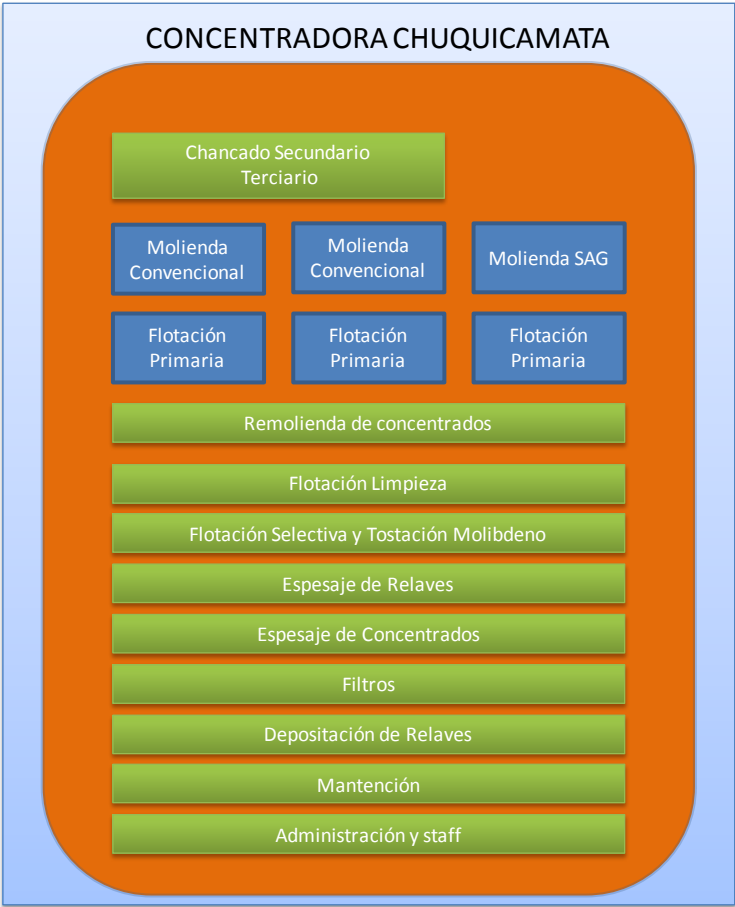


Ilustración 8.3: Operaciones unitarias concentradora

A continuación se muestra una tabla con el gasto considerado para la concentradora de Chuquicamata.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Remuneraciones</b>	<b>56.263</b>	<b>56.263</b>	<b>56.263</b>	<b>56.263</b>	<b>56.263</b>	<b>56.263</b>	<b>56.263</b>	<b>55.931</b>	<b>56.479</b>
Rol A	6.651	6.651	6.651	6.651	6.651	6.651	6.651	6.444	6.845
Rol B	49.612	49.612	49.612	49.612	49.612	49.612	49.612	49.487	49.635
<b>Materiales</b>	<b>125.103</b>	<b>125.076</b>	<b>124.043</b>	<b>122.330</b>	<b>122.863</b>	<b>122.503</b>	<b>124.287</b>	<b>123.401</b>	<b>122.717</b>
Bolas 1 1/2 pulg	2.394	2.365	2.360	2.366	2.360	2.334	2.334	2.340	2.332
Bolas 2 pulg	16.132	16.026	15.744	15.488	15.431	15.431	15.431	15.465	15.402
Bolas 3 pulg	10.125	10.092	9.549	9.360	9.345	9.345	9.345	9.371	9.345
Bolas 5 pulg	10.733	10.490	10.121	9.932	9.916	9.916	9.916	9.943	9.916
Barras	15.577	15.165	14.261	13.862	13.811	13.811	13.811	13.842	13.785
Colector Primario	2.428	2.474	2.475	2.474	2.467	2.467	2.467	2.474	2.465
Colector Secundario	3.247	3.278	3.278	3.240	3.231	3.231	3.231	3.239	3.228
Espumante	3.057	3.078	3.079	3.034	3.026	3.026	3.026	3.033	3.023
NaHS	10.156	9.409	9.059	8.415	7.158	6.964	9.089	7.680	7.208
Otros Materiales	51.254	52.697	54.118	54.157	56.120	55.979	55.637	56.014	56.014
<b>Combustibles</b>	<b>1.265</b>	<b>1.291</b>	<b>1.324</b>	<b>1.323</b>	<b>1.290</b>	<b>1.328</b>	<b>1.328</b>	<b>1.328</b>	<b>1.338</b>
Otros Combustibles	1.265	1.291	1.324	1.323	1.290	1.328	1.328	1.328	1.338
<b>Servicios de Terceros</b>	<b>69.491</b>	<b>51.652</b>	<b>52.021</b>	<b>52.027</b>	<b>53.105</b>	<b>53.105</b>	<b>53.105</b>	<b>53.093</b>	<b>53.093</b>
Otros Servicios	69.491	51.652	52.021	52.027	53.105	53.105	53.105	53.093	53.093
<b>Suministros</b>	<b>158.555</b>	<b>160.656</b>	<b>158.665</b>	<b>155.505</b>	<b>155.713</b>	<b>156.218</b>	<b>157.384</b>	<b>155.608</b>	<b>158.370</b>
Energía	56.160	56.356	55.810	52.532	52.478	52.463	52.389	52.096	57.821
Potencia	60.830	62.238	62.873	63.946	65.398	65.398	65.398	65.256	62.485
Agua	15.436	15.765	15.770	15.838	15.794	15.793	15.792	15.672	15.526
Cal	10.864	11.097	11.098	11.129	11.057	11.057	11.057	11.085	11.046
Otros	15.266	15.200	13.113	12.060	10.985	11.506	12.748	11.499	11.491
<b>Otros</b>	<b>64.416</b>	<b>61.583</b>	<b>61.488</b>	<b>60.805</b>	<b>61.325</b>	<b>61.266</b>	<b>61.564</b>	<b>61.274</b>	<b>61.767</b>
Mantenimiento	64.416	61.583	61.488	60.805	61.325	61.266	61.564	61.274	61.767
<b>Total</b>	<b>475.094</b>	<b>456.521</b>	<b>453.803</b>	<b>448.253</b>	<b>450.558</b>	<b>450.683</b>	<b>453.930</b>	<b>450.635</b>	<b>453.765</b>

Tabla 8.3: Gastos concentradora Chuquicamata en miles US\$

Desde el punto de vista de los ingresos, los datos utilizados provienen desde las orientaciones comerciales de la corporación con información acerca precios del cobre, subproductos, cargos por tratamiento, cargos por refinación, etc.

Con esta información base se determinan las tarifas de cobre fino contenido en concentrado y molibdeno, que determinan los ingresos considerados en este estudio ya que como se mencionó anteriormente el alcance es una evaluación a producto contenido en concentrado.

1.1 Concentrado tipo Chuqui (venta de,)		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Precio del cobre	c/lb	367	325	306	300	291	275	275	275	275
Precio del cobre	US\$/tf	8.091	7.165	6.746	6.614	6.415	6.063	6.063	6.063	6.063
Ley de cobre	%	31,02	30,34	30,40	30,52	30,63	31,71	31,86	30,76	32,70
Ley Plata	ppm	103	110	111	110	109	110	120	121	105
Ley Oro	ppm	0,36	0,38	0,38	0,38	0,37	0,38	0,42	0,42	0,36
Humedad	%	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
Arsénico	%	0,76	0,80	0,85	0,74	0,38	0,27	0,52	0,62	1,06
Deducción Metalúrgica Cu	%	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
Deducción Metalúrgica Cu	US\$/tf	-275,1	-243,6	-229,4	-224,9	-218,1	-206,1	-206,1	-206,1	-206,1
TC	US\$/tms	-65,0	-70,0	-90,0	-110,0	-125,0	-125,0	-125,0	-125,0	-125,0
RC	cUS\$/lb	-6,5	-7,0	-9,0	-11,0	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5	-12,5
RC	US\$/tf	-143,3	-154,3	-198,4	-242,5	-275,6	-275,6	-275,6	-275,6	-275,6
Descuento combinado	US\$/tf	-348,0	-379,8	-487,8	-594,7	-674,3	-660,4	-658,6	-672,6	-648,5
Precio Plata	US\$/oz	29,0	24,4	20,0	16,3	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
Precio Oro	US\$/oz	1720	1480	1348	1126	962	962	962	962	962
Descuento Met Plata	ppm	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Descuento Met Oro	ppm	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Crédito plata	US\$/tf	265,7	244,6	202,9	162,8	151,2	147,6	163,8	170,6	135,7
Crédito oro	US\$/tf	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Deducción As	%	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Penalidad...	US\$/tms	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
...Cada	%	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Penalidad por Arsénico	US\$/tf	-54,5	-59,0	-63,9	-52,6	-17,4	-6,3	-30,4	-40,8	-78,6
<b>SUB TOTAL BASE FURE EXTERNAS</b>	<b>US\$/tf</b>	<b>-412</b>	<b>-438</b>	<b>-578</b>	<b>-709</b>	<b>-759</b>	<b>-725</b>	<b>-731</b>	<b>-749</b>	<b>-798</b>
<b>PRECIO FURE EXTERNAS</b>		<b>7.679</b>	<b>6.727</b>	<b>6.168</b>	<b>5.905</b>	<b>5.657</b>	<b>5.337</b>	<b>5.331</b>	<b>5.314</b>	<b>5.265</b>
Comisión por venta	US\$/tms	-0,60	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,61	-0,62	-0,59	-0,63
Comisión por venta	US\$/tf	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9
Muestreo y análisis	US\$/tms	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09
Muestreo y análisis	US\$/tf	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Flete desde Chuq.	US\$/tmh	-69,3	-71,9	-74,5	-74,5	-74,5	-74,5	-74,5	-74,5	-74,5
Flete desde Chuq.	US\$/tf	-244,2	-258,9	-267,8	-266,7	-265,8	-256,7	-255,6	-264,7	-249,0
<b>DESCUENTO TOTAL FOT Chuqui</b>	<b>US\$/tf</b>	<b>-658</b>	<b>-699</b>	<b>-848</b>	<b>-978</b>	<b>-1027</b>	<b>-984</b>	<b>-989</b>	<b>-1016</b>	<b>-1049</b>
<b>TOTAL CONCENTRADO A VENTA</b>	<b>ktmh</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>DETERMINACION DE COSTOS DE LOGISTICA</b>										
Porcentaje de CuCon que va a Potrerillos	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Porcentaje de CuCon que va a Escondida	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Porcentaje de CuCon que va a Japón	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suma		100	100	100	100	100	100	100	100	100
Logística nacional (a MJP)	US\$/tmh	-11,48	-11,94	-12,41	-12,41	-12,4	-12,4	-12,4	-12,4	-12,4
Flete internacional (a MJP)	US\$/tmh	-71,0	-74,0	-77,0	-77,0	-77,0	-77,0	-77,0	-77,0	-77,0
<b>Total flete a Japón</b>	<b>US\$/tmh</b>	<b>-82,48</b>	<b>-85,94</b>	<b>-89,41</b>	<b>-89,41</b>	<b>-89,41</b>	<b>-89,41</b>	<b>-89,41</b>	<b>-89,41</b>	<b>-89,41</b>
Flete interno (a Potrerillos)	US\$/tmh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Logística nacional (a Potrerillos)	US\$/tmh	-29,8	-29,8	-29,8	-29,8	-29,8	-29,8	-29,8	-29,8	-29,8
<b>Total flete a Potrerillos</b>	<b>US\$/tmh</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>	<b>-29,8</b>
<b>Ahorro a Potrerillos</b>	<b>US\$/tmh</b>	<b>52,7</b>	<b>56,2</b>	<b>59,7</b>	<b>59,7</b>	<b>59,7</b>	<b>59,7</b>	<b>59,7</b>	<b>59,7</b>	<b>59,7</b>
<b>PRECIO VENTA</b>	<b>US\$/tf</b>	<b>7.433</b>	<b>6.466</b>	<b>5.898</b>	<b>5.636</b>	<b>5.389</b>	<b>5.079</b>	<b>5.074</b>	<b>5.047</b>	<b>5.014</b>
Factor Pcu a tarifa Concentrado		0,92	0,90	0,87	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83

Tabla 8.4: Precio venta cobre fino contenido en concentrado

Otro ingreso relevante para este estudio tiene relación con el molibdeno puesto que las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic presentan cantidades importantes de este mineral, siendo las leyes de Chuquicamata bastante superiores a las de Radomiro Tomic.

Para el análisis y a modo de simplificación se considerará para el cálculo de los ingresos por molibdeno la tarifa correspondiente a la molibdenita sucia con la finalidad de homologar el producto obtenido para las simulaciones que se realicen.

En la siguiente tabla se muestra la determinación de las tarifas asociadas al molibdeno dependiendo de la calidad del producto, la base de cálculo se obtiene de las orientaciones comerciales de la corporación.

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Molibdeno</b>		US\$/kg	30	32	25	25	30	30	30	30
<b>1. Molibdenita Limpia: &lt;0,4% Cu</b>										
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Ley de Molibdeno	%	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Deducción Metalúrgica	US\$/kg	-0,38	-0,40	-0,31	-0,31	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38
Tostación	US\$/kg	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12
Fletes internos (planta/maquilador/puerto)	US\$/kg	-0,110	-0,110	-0,110	-0,110	-0,110	-0,110	-0,110	-0,110	-0,110
Cargo Tostación Molibdenita Limpia	US\$/kg	-1,61	-1,63	-1,54	-1,54	-1,61	-1,61	-1,61	-1,61	-1,61
Tarifa Molibdenita limpia	US\$/kg Mo	28,0	29,9	23,0	23,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0
<b>2. Molibdenita Sucia: &gt;0,4% Cu</b>										
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Ley de Molibdeno	%	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Deducción Metalúrgica	US\$/kg	-0,68	-0,72	-0,56	-0,56	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68
Tostación+Lixiviación	US\$/kg	-1,48	-1,48	-1,48	-1,48	-1,48	-1,48	-1,48	-1,48	-1,48
Fletes internos (planta/maquilador/puerto)	US\$/kg	-0,230	-0,230	-0,230	-0,230	-0,230	-0,230	-0,230	-0,230	-0,230
Cargo Tost.+Lixiv. Molibdenita Sucia	US\$/kg	-2,39	-2,43	-2,27	-2,27	-2,39	-2,39	-2,39	-2,39	-2,39
Tarifa Molibdenita sucia	US\$/kg Mo	27,2	29,1	22,3	22,3	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2
<b>3. OxMo Alto Cu: &gt; 0,3%</b>										
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Ley de Molibdeno	%	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Deducción Metalúrgica	US\$/kg	-0,38	-0,40	-0,31	-0,31	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38
Lixiviación	US\$/kg	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52
Fletes internos (planta/maquilador/puerto)	US\$/kg	-0,057	-0,057	-0,057	-0,057	-0,057	-0,057	-0,057	-0,057	-0,057
Cargo Tostación Molibdenita Sucia	US\$/kg	-0,95	-0,98	-0,89	-0,89	-0,95	-0,95	-0,95	-0,95	-0,95
Tarifa OxMo Alto Cu	US\$/kg Mo	28,60	30,57	23,66	23,66	28,60	28,60	28,60	28,60	28,60
<b>4. OxMo Bajo Cu: &lt; 0,3%</b>										
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Producción Briquetas	Kg/año									
Premio Briquetas / Cans	US\$/kg	0,331	0,331	0,331	0,331	0,331	0,331	0,331	0,331	0,331
Maquila Adicional Molymet	US\$/kg	-0,066	-0,066	-0,066	-0,066	-0,066	-0,066	-0,066	-0,066	-0,066
Cargo Fijo por Maquila Briquetear	US\$/kg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Tarifa OxMo Bajo Cu	US\$/kg	28,86	30,8	23,9	23,9	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9

Tabla 8.5: Precio venta molibdeno

## 8.2 Conjunto de variables

En el análisis del problema se pueden identificar dos grupos de variables involucradas:

- Variables cuantitativas
- Variables cualitativas

### 8.2.1 Variables cuantitativas

Como su nombre lo indica son aquellas variables que se pueden cuantificar y corresponden a variables que dependen del mineral y a variables que dependen de la planta y/o proceso involucrado.

Este tipo de variables son las que se incorporan al modelo de programación lineal que busca optimizar el envío a plantas concentradoras.

La dificultad radica que hay variables, como se verá más adelante, que juegan a favor de procesar más mineral de Chuquicamata y otras en cambio inclinan la balanza hacia el procesamiento de mineral de Radomiro Tomic.

#### **Variable ley de Cobre**

La ley de cobre de Chuquicamata es una variable que a excepción del año 2013 presenta valores superiores al mineral de Radomiro Tomic, como se observa en la siguiente gráfica.



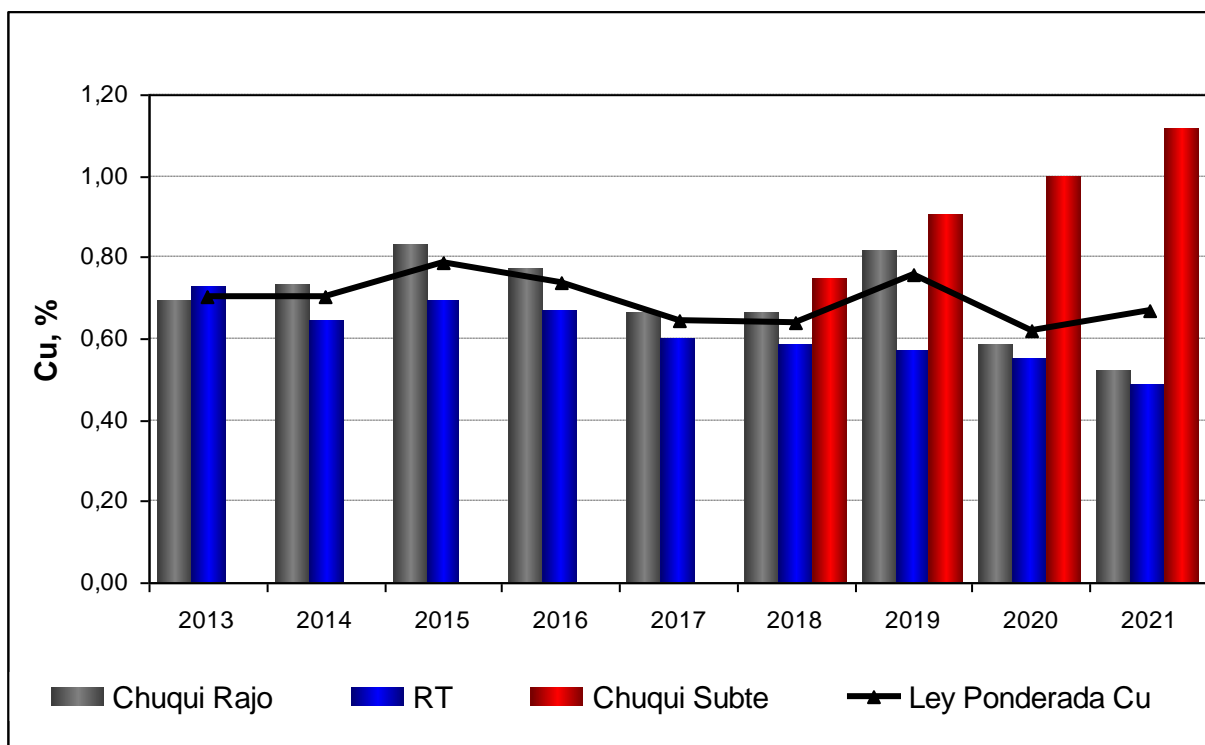


Ilustración 8.4: Gráfico ley de Cobre

Un análisis preliminar indicaría que si se considerara solo esta variable, lo óptimo sería enviar una proporción mayor de minerales de Chuquicamata por sobre los de Radomiro Tomic, en cambio usando la misma lógica el año 2013 se esperaría que el envío de Radomiro Tomic fuera mayor a Chuquicamata.

***Variable ley de Molibdeno***

La ley de molibdeno del mineral de Chuquicamata es considerablemente superior a la ley del mineral de Radomiro Tomic, esto se observa claramente en la siguiente gráfica.

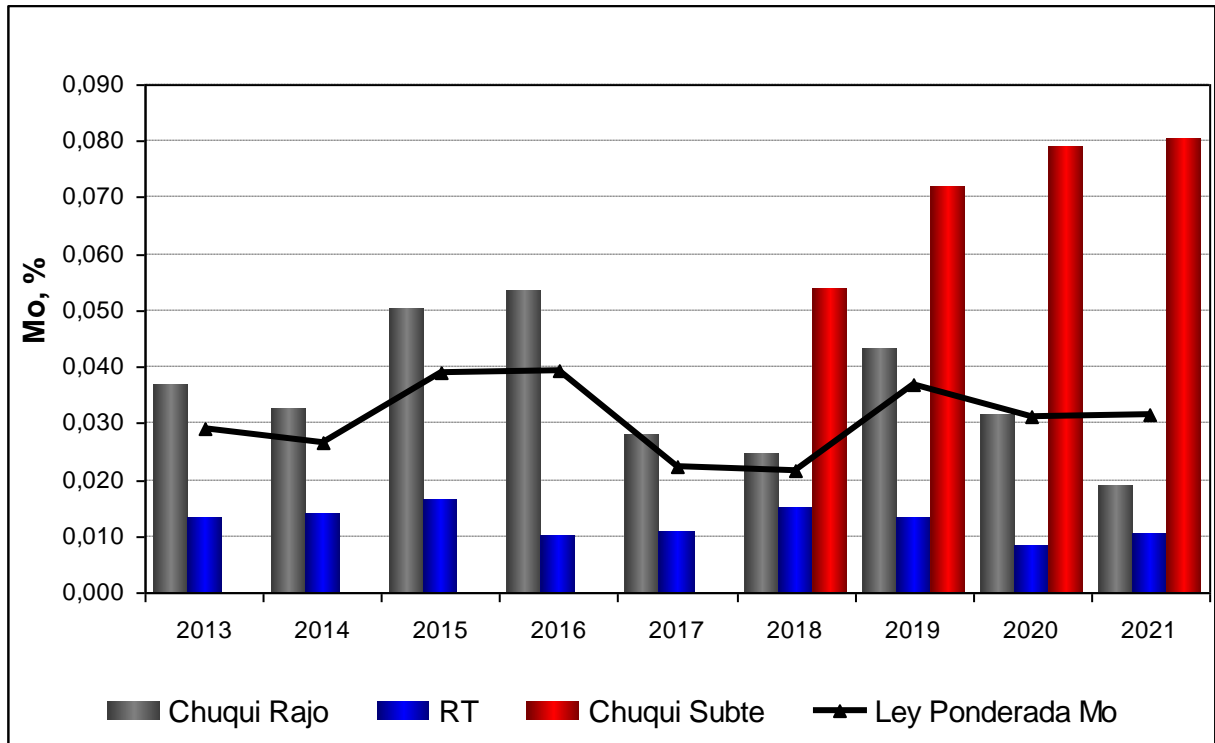


Ilustración 8.5: Gráfico ley de Molibdeno

El molibdeno es una variable importante y relevante en el cálculo de los ingresos, por que ella por sí sola empuja el modelamiento hacia enviar más mineral de Chuquicamata por sobre el mineral de Radomiro Tomic.

### **Variable ley de Arsénico**

Desde el punto de vista ambiental, una de las variables más incidentes corresponde a la ley de Arsénico, en la gráfica siguiente se aprecia la notable diferencia entre los minerales de Chuquicamata y Radomiro Tomic, mostrando claramente que el mineral de Radomiro Tomic es un mineral limpio versus el mineral de Chuquicamata que es un mineral complejo desde el punto vista de esta variable.

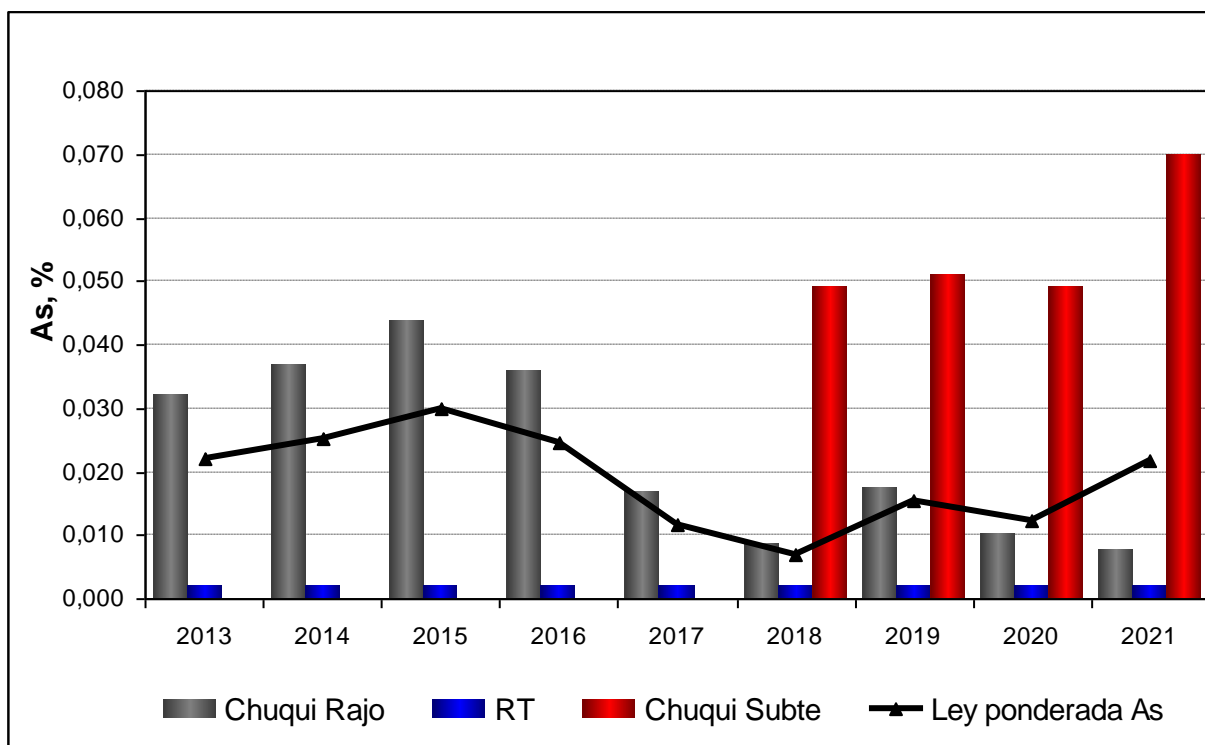


Ilustración 8.6: Gráfico ley de Arsénico

Un análisis preliminar de la ilustración anterior indica que para el cumplimiento de la normativa ambiental, el envío de mayor cantidad de mineral proveniente de Radomiro Tomic facilita el cumplimiento de dicha normativa.

De igual manera si se generan excedentes de concentrado lo ideal es que tengan la menor concentración de Arsénico de modo que sea un producto comercial, esto solo se logra si el envío de Radomiro Tomic es alto, o si se separan las líneas concentradoras con la finalidad de obtener dos productos.

### **Variable recuperación de Cobre**

El mineral de Radomiro Tomic al ingresar a una planta concentradora que está diseñada para el mineral de Chuquicamata, presenta una pérdida de recuperación ya que el mineral de Radomiro Tomic requiere un estándar diferente en términos de grado de molienda y tiempos de residencia de flotación, esta diferencia de recuperación de Cobre se aprecia en la siguiente gráfica.

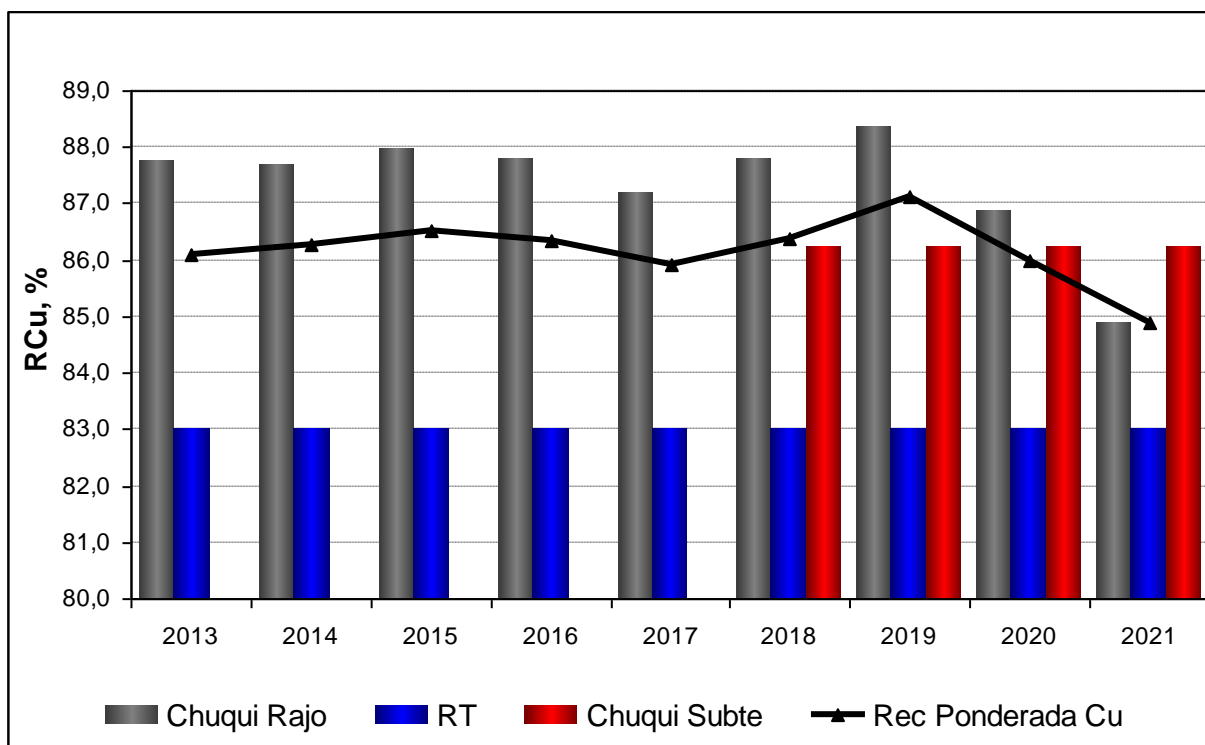


Ilustración 8.7: Gráfico recuperación de Cobre

Esta diferencia de recuperación juega a favor del mineral de Chuquicamata por sobre el de Radomiro Tomic.

### ***Variable recuperación de Molibdeno***

Análogamente a lo que sucede con el Cobre, el mineral de Radomiro Tomic al ingresar a una planta concentradora que está diseñada para el mineral de Chuquicamata, presenta una pérdida de recuperación de Molibdeno ya que el mineral de Radomiro Tomic requiere un estándar diferente en términos de grado de molienda y tiempos de residencia de flotación, esta diferencia de recuperación de Molibdeno se aprecia en la siguiente gráfica.

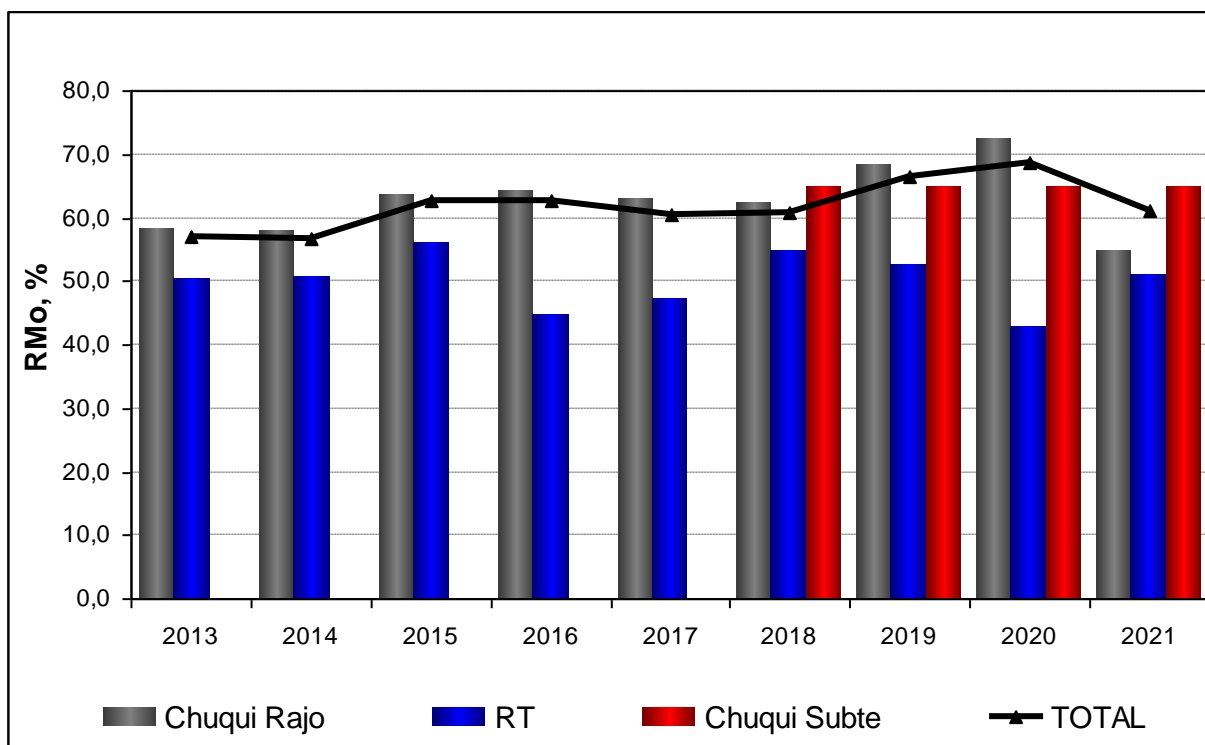


Ilustración 8.8: Gráfico recuperación de Molibdeno

Esta diferencia de recuperación de Molibdeno juega a favor del mineral de Chuquicamata por sobre el de Radomiro Tomic.

#### **Variable costo mina**

Respecto al costo mina se puede decir que existe una diferencia importante entre las minas Chuquicamata y Radomiro Tomic, la primera presenta un costo promedio entre los 2,8 y 3,0 US\$/ton de material movido en cambio Radomiro Tomic presenta valores cercanos a los 2,1 US\$/ton, esta diferencia se explica principalmente por la antigüedad del rajo Chuquicamata cuya profundización implica mayores distancias y por consiguiente un mayor número de camiones, adicionalmente las productividades y rendimientos de los equipos son menores a los presentados por Radomiro Tomic. Esta diferencia tiende a favorecer el envío de los minerales de Radomiro Tomic por sobre los de Chuquicamata.

#### **Variable razón lastre/mineral**

Otra variable que presenta diferencias favorables al envío de Radomiro Tomic es la razón lastre mineral, en este caso Radomiro Tomic posee relaciones L/M de 1,1 versus los 2,5 de Chuquicamata, lo que se traduce en un mayor gasto de Chuquicamata por tonelada de mineral.

#### **Variable costo chancado primario**

Para el caso de los costos plantas, como se mencionó anteriormente la diferencia se considera en la operación unitaria de chancado primario, ya que mineral de Radomiro Tomic se procesa en las instalaciones del proyecto RT Fase I, que cuenta con un

chancador primario y un sistema de transporte que consta de una correa overland que envía el mineral desde RT hacia la planta concentradora de Chuquicamata.

En cambio, el mineral de Chuquicamata se procesa en los chancadores primarios de la División, esta operación unitaria consta de cuatro chancadores primarios y todo un sistema de transferencia de mineral y correas transportadoras que envía el mineral a las plantas concentradoras de Chuquicamata.

Esta diferencia en la cantidad de equipos, tecnología y antigüedad, se traduce en la diferencia de costo unitario en las etapas de chancado primario de las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic. Los costos unitarios de la etapa de chancado primario se observa en la siguiente gráfica.

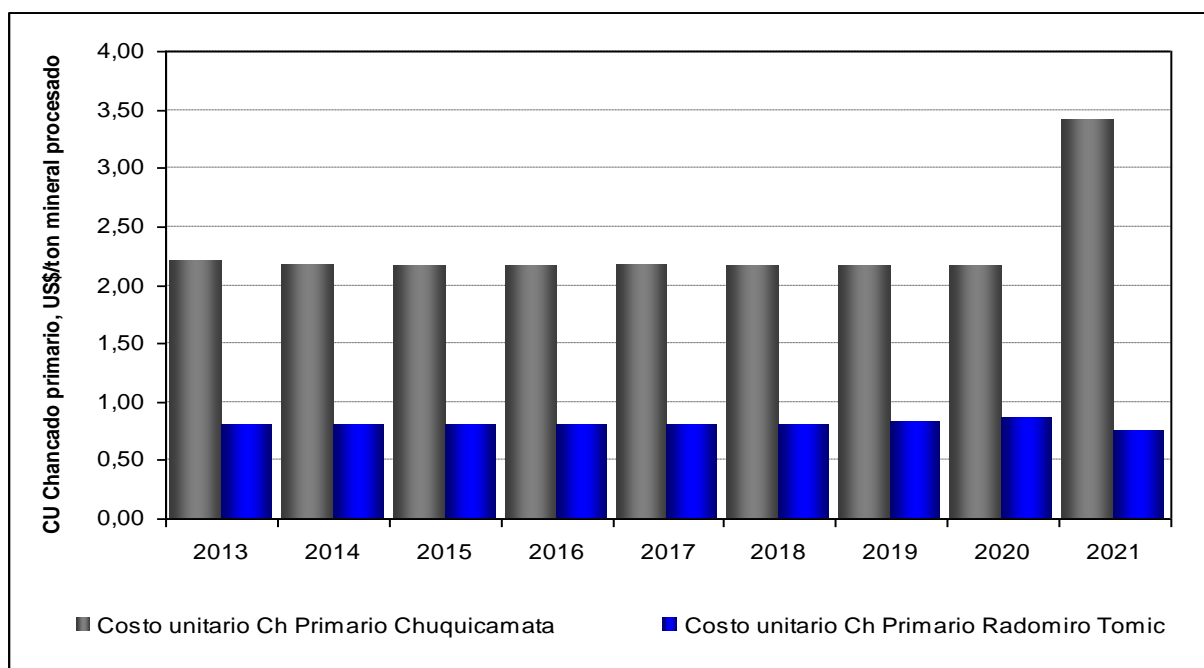


Ilustración 8.9: Gráfico costo unitario chancado primario

La importante diferencia de costos en la etapa de chancado juega a favor del envío del mineral de Radomiro Tomic por sobre el de Chuquicamata.

Como se observa del conjunto de variables cuantitativas, algunas de ellas apuntan a aumentar el envío de Chuquicamata y otras apuntan a aumentar el envío desde Radomiro Tomic, claramente cada variable tiene un peso distinto en la decisión por lo que la fortaleza de la programación lineal busca que considerando estas variables, se escoja la mezcla óptima que maximice el beneficio del distrito.

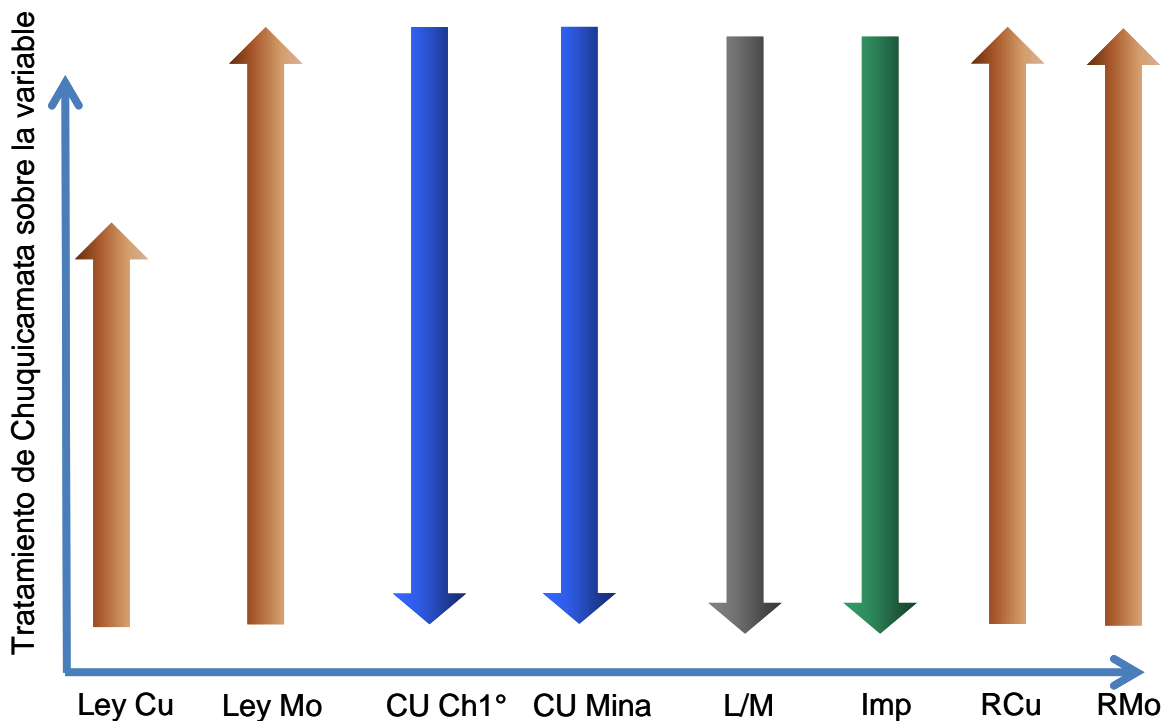


Ilustración 8.10: Gráfico efecto de la variable sobre el tratamiento de Chuquicamata

No obstante lo anterior cabe destacar que las variables cualitativas cumplen un rol fundamental en la decisión final.

### 8.2.2 Variables cualitativas

Corresponden a aquellas variables que no se cuantifican por lo que no entran en el modelo, pero que se consideran en la decisión final, haciendo que la elección muchas veces puede estar dentro del espacio factible, pero no es el óptimo necesariamente.

Dentro de estas variables se encuentran:

#### ***Variables estratégicas***

Ambas Divisiones cuentan con proyectos futuros, para el caso de Chuquicamata está la entrada en operación de la mina subterránea a partir de 2018 y para Radomiro Tomic el proyecto RT Fase II a partir de 2016, por lo que se hace necesario compatibilizar las decisiones de corto plazo con las de largo plazo con la finalidad de no hipotecar el futuro de las divisiones.

Dentro de las decisiones estratégicas se encuentra la cartera comercial del distrito, si se opta por venta de concentrados, los excedentes de concentrado generados deben cumplir con los requerimientos de calidad en relación a las impurezas, en este sentido se debe optar por separar las líneas concentradoras con la finalidad de obtener dos calidades de concentrados, uno limpio de Radomiro Tomic y otro complejo de Chuquicamata, otra alternativa es aumentar el envío de Radomiro Tomic, para diluir el contenido de impurezas, en una razón tal para obtener un producto comercial, por último es considerar el negocio Fundición de manera corporativa y de esta manera los concentrados no comerciales se pueden mezclar con otros concentrados y alimentar las

Fundiciones de la corporación como puede ser Potrerillos, cumpliendo la normativa ambiental en todos los casos.

La función objetivo también se puede ver modificada por variables estratégicas, si bien en el presente estudio se busca maximizar el beneficio, por medio del compromiso que existe en costos y los ingresos, en algún momento la estrategia puede definir que la función objetivo busque maximizar el cobre fino.

Por lo anterior cobra mayor relevancia el hecho que la mirada debe ser distrital y no local por las divisiones para compatibilizar las decisiones con el marco estratégico de la corporación.

### ***Variables laborales***

Las consideraciones laborales son una parte compleja del análisis puesto que las divisiones se miden por compromisos propios en relación a cobre propio, gasto e indicadores operacionales como es la recuperación, como se mencionó en las variables propias del mineral, en general el mineral de Radomiro Tomic tiene un comportamiento fuera del óptimo en la concentradora de Chuquicamata porque los estándares de molienda y flotación están diseñados para el mineral de Chuquicamata, por lo que una mirada distrital en la alimentación de las plantas concentradoras implica hacer una revisión a los compromisos Divisionales teniendo una mirada integral del negocio.

Para que esto sea posible se hace necesario que la calidad de la información y/o caracterización del mineral sea de la misma calidad y con el mismo estándar entre las divisiones, para evitar temas asociados a la interpretación de los resultados, una de las principales dificultades que se tiene cuando se procesan minerales de diferentes divisiones en una misma planta es la repartición del producto final, traduciéndose en discusiones sobre los indicadores que inciden en los resultados, como son la calidad del mineral, ley, recuperación entre otras.

La separación de líneas para mineral de Chuquicamata y Radomiro Tomic no solo ayuda en términos de obtener dos calidades de concentrados sino que también permite diferenciar el comportamiento del mineral en las plantas por lo que se pueden elaborar convenios de desempeño diferenciados por esta “maquila” de mineral de Radomiro Tomic.

## **8.3 Restricciones**

Las restricciones en programación lineal son las encargadas de configurar el espacio factible de las soluciones, de ahí la importancia de ellas. Para el estudio consideramos restricciones de capacidad, restricciones de emisión, proyectos de optimización.

### ***Restricciones de capacidad***

La primera restricción o condición que se debe cumplir para establecer el espacio factible de soluciones es la capacidad de las plantas concentradoras.

La concentradora Chuquicamata posee tres plantas de beneficio de mineral que configuran la capacidad máxima de tratamiento.

Las capacidades nominales de dichas plantas es:



- Planta A0: 70.000 t/d
- Planta A1: 34.000 t/d
- Planta A2: 78.000 t/d

Por lo que la suma de los envíos no debe superar las 182.000 t/d

Por otro lado el proyecto RT Fase I incorporó un chancador primario y una correa transportadora desde Radomiro Tomic a las plantas concentradoras de Chuquicamata con una capacidad nominal de 100.000 t/d, con esta restricción el envío máximo desde Radomiro Tomic a Chuquicamata queda limitado a este valor.

Por otra parte los diseños mineros de Chuquicamata establecen su máximo envío de mineral a las plantas concentradoras en 152.000 t/d.

### ***Restricciones ambientales***

Esta restricción esta asociada al cumplimiento de la normativa ambiental como toneladas de Arsénico por año máxima permitida, para ello se considera un factor de emisión asociado al Arsénico fino contenido en concentrado, que debe cumplir la normativa vigente.

Dentro de las restricciones ambientales, se agrega que los excedentes de concentrados no puedan superar el 1% de As en concentrado, si bien este valor no garantiza la comercialización de los concentrados, si nos permite gestionar el tratamiento en otras fundiciones de la corporación.

### ***Restricciones de proyectos***

Resulta importante considerar dentro de las restricciones los proyectos que están en carpeta dentro del quinquenio, como es la instalación de un quinto molino de bolas en la planta A2, lo agrega potencia adicional a la molienda secundaria, con esto se logra aumentar la recuperación de Cobre en cuatro puntos porcentuales y la recuperación de Molibdeno en 3 puntos porcentuales, esto cobra relevancia si el mineral de Radomiro Tomic ingresa en esta planta ya que la brecha de recuperación de Cobre de estos minerales se reduce al mínimo.

## **8.4 Función objetivo**

Para este estudio se buscará maximizar la función de beneficio

$$\text{Beneficio} = \text{Ingresos totales} - \text{costos totales}$$

Los ingresos totales serán determinados por:

- Ingresos por Cobre
- Ingresos por Molibdeno

Para valorizar los ingresos se debe determinar el cobre fino y molibdeno fino contenido en concentrado y de esta manera se irán reconociendo las variables involucradas en el problema.

$$Cu\ fine_i = \text{Mineral procesado}_i \times \text{ley } Cu_i \times \text{Rec } Cu_i$$

$$Mo\ fino_i = Mineral\ procesado_i \times ley\ Mo_i \times Rec\ Mo_i$$

Con i: DCH, DRT

$$Ingreso\ Cu_i = Cu\ fino_i \times (Precio\ Cu - descuentos_i)$$

Con i: DCH, DRT

Para determinar el precio del concentrado de cobre se basará en las orientaciones comerciales de la corporación por lo que se consideran premios y penalidades diferentes a cada división ya que las calidades de estos minerales son diferentes en términos de impurezas y elementos que significan un crédito como es la Plata (Ag).

$$Ingreso\ Mo_i = Mo\ fino_i \times (Precio\ Mo - descuentos_i)$$

Con i: DCH, DRT

Por lo que los ingresos totales están dados por la suma de los ingresos por Cobre y Molibdeno de las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic

$$Ingreso\ Total = Ingreso\ Cu_i + Ingreso\ Mo_i$$

Con i: DCH, DRT

Para el caso de los costos, éstos se determinaran sobre el mineral procesado por cada división y el costo unitario asociado a ellos, si bien el mineral es procesado en la misma planta, existe una operación unitaria que se realiza stand alone en cada división, que es el chancado primario y esta operación es de menor costo en Radomiro Tomc, el costo unitario para el mineral proveniente de esta división debe ser levemente menor.

$$Costo\ Total_i = Mineral\ procesado_i \times CU_i$$

$$Beneficio_{DCH} = Mineral\ procesado_{DCH} \times (ley\ Cu_{DCH} \cdot Rec\ Cu_{DCH} + ley\ Mo_{DCH} \cdot Rec\ Mo_{DCH} - CU_{DCH})$$

$$Beneficio_{DRT} = Mineral\ procesado_{DRT} \times (ley\ Cu_{DRT} \cdot Rec\ Cu_{DRT} + ley\ Mo_{DRT} \cdot Rec\ Mo_{DRT} - CU_{DRT})$$

La función a maximizar es la suma de los beneficios de las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic.

$$Beneficio_{total} = Mineral\ procesado_{DCH} \times (ley\ Cu_{DCH} \cdot Rec\ Cu_{DCH} + ley\ Mo_{DCH} \cdot Rec\ Mo_{DCH} - CU_{DCH}) + Mineral\ procesado_{DRT} \times (ley\ Cu_{DRT} \cdot Rec\ Cu_{DRT} + ley\ Mo_{DRT} \cdot Rec\ Mo_{DRT} - CU_{DRT})$$

En este caso la variable a optimizar es el mineral procesado de las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic, donde las leyes recuperaciones de Cobre y Molibdeno y el costo unitario son datos.

Las primeras restricciones que se consideran son las más básicas y tienen relación con la capacidad limitada de plantas.

Restricción 1: capacidad de plantas 182 kt/d por lo que:

$$Restricción\ 1: Mineral_{DCH} + Mineral_{DRT} = 182\ kt/d$$

Restricción 2: capacidad de chancado más transporte desde DRT es 100 kt/d

$$\text{Restricción 2 : Mineral}_{DRT} \leq 100 \text{ kt/d}$$

Con estas 2 restricciones y la función objetivo a optimizar uno podría esperar como resultado que la división Chuquicamata envíe el máximo de mineral en desmedro de Radomiro Tomic, no obstante este estudio busca un análisis más integrado donde esté involucrada la ley de Arsénico (As) dentro de la función objetivo, lo que podría hacer variar los resultados si el concentrado generado debe comercializarse dado que las fundiciones podrían estar copadas en capacidad.

Esto significa que dentro de este estudio se agregarán restricciones de modo que se haga cargo de la variable ambiental como es la ley de Arsénico en concentrado y proyectos en desarrollo como es el caso del quinto molino de bolas que agrega mayor recuperación a la planta de molienda SAG.

## 9.0 Resultados

Para el análisis de los resultados, primero se desarrollo una simulación que presenta la situación base, considerando un envío de 122 kt/d de Chuquicamata y 60 kt/d de Radomiro Tomic, para ello se consideró la base de costos del Plan de Negocios 2012 y se utilizaron valores referenciales de leyes.

La metodología compara el beneficio actualizado (ingresos – costos) de cada una de las alternativas que resultó dependiendo de las restricciones que se fueron agregando. El horizonte de evaluación corresponde al quinquenio 2013-2017, para ello se busca el óptimo de envío en cada año tal que maximice el valor actualizado neto del beneficio en el periodo mencionado anteriormente. A continuación se presentan los datos de carga base para las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic.

<b>División Chuquicamata</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral Ch	kt/d	122	122	122	122	122
Mineral Ch	kts	43.920	43.920	43.920	43.920	43.920
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	87,8	87,1	87,3	86,7	86,5
Fino Cu Ch	ktf	267	292	315	283	251
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	9.434	8.990	14.718	13.910	7.334
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	12,0	13,8	16,1	12,1	5,4
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	922	1.006	1.085	975	864

Tabla 9.1: Datos generales caso base Chuquicamata

<i>División Radomiro Tomic</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral RT	kt/d	60	60	60	60	60
Mineral RT	kts	21.600	21.600	21.600	21.600	21.600
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Fino Cu RT	ktf	133	116	126	134	109
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Fino Mo RT	tf	1.432	1.081	1.859	1.512	1.080
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	392	342	372	393	322

Tabla 9.2: Datos generales caso base Radomiro Tomic

De las tablas anteriores se obtiene información del aporte de mineral que define los gastos, información de la producción de Cobre y Molibdeno que proporcionará los ingresos, el fino de Arsénico que nos proporcionará información acerca la calidad de los concentrados en relación a esta impureza y sobre las emisiones de la fundición, por otra parte tenemos la masa de concentrado que proporciona información valiosa acerca los excedentes.

Un resumen de lo anterior se muestra en siguiente tabla, donde se observa que el beneficio actualizado para una razón de envío de 122 kt/d de Chuquicamata y 60 kt/d de Radomiro Tomic es de 7.065 millones de dólares.

La diferencia que se observa en el gasto mina entre las divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic se explica sobre la base que la División Radomiro Tomic es una mina todavía de óxidos donde gran parte del movimiento y desarrollo es para estos minerales, a diferencia que Chuquicamata que es una mina de sulfuros que se lleva gran parte del gasto.

La disminución del costo concentradora se explica en gran parte por la caída del precio de la energía que entregan las orientaciones comerciales de la corporación.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.773	1.713	1.739	1.534	1.318
Ingreso Mo Ch	MUS\$	255	261	324	306	198
Ingreso Cu RT	MUS\$	885	683	699	725	575
Ingreso Mo RT	MUS\$	39	31	41	33	29
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	307	307	307	307	307
Gasto Mina RT	MUS\$	50	50	50	50	50
Gasto CH	MUS\$	697	681	681	681	681
Gasto RT	MUS\$	215	201	201	201	201
Ingreso CH RT	MUS\$	2.952	2.687	2.803	2.598	2.121
Gasto CH RT	MUS\$	912	882	882	882	882
beneficio	MUS\$	2.039	1.806	1.921	1.716	1.239
Actualizado		<i>7.065</i>				

Tabla 9.3: Resultados situación base

Por otra parte, la tabla sobre excedentes de concentrados de la situación base muestra que éstos se reducen o eliminan si se considera el proyecto de separación de líneas en la planta concentradora de Chuquicamata, puesto que estos excedentes serían de Radomiro Tomic y no de la mezcla como se observa en la tabla, en el caso que sean de Radomiro Tomic se tiene la ventaja que son concentrados limpios, del orden de 0,1% As contenido en concentrado, que se pueden comercializar sin problemas y la masa concentrado de Chuquicamata está en línea con la capacidad de Fundición disponible.

		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	922	1.006	1.085	975	864
AsCo Chuquicamata	%	1,30	1,37	1,49	1,24	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	392	342	372	393	322
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,10	0,10	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.314	1.347	1.456	1.369	1.186
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	237	446	359	176
Asco ponderado	%	-	1,05	1,13	0,9	0,5

Tabla 9.4: Excedentes de concentrado situación base

Cuando se hace una simulación solo con las restricciones de las capacidades plantas de los máximos envíos permitidos por las Divisiones como son la capacidad de la correa desde Radomiro Tomic y el máximo envío de Chuquicamata por diseño minero, considerando además que se cumpla la normativa ambiental, se obtienen los resultados presentados en las siguientes tablas.

<i>División Chuquicamata</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral Ch	kt/d	82	152	127	152	152
Mineral Ch	kts	29.520	54.720	45.849	54.720	54.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	87,8	87,1	87,3	86,7	86,5
Fino Cu Ch	ktf	180	363	328	352	312
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	6.341	11.200	15.364	17.331	9.137
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	8,1	17,2	16,8	15,1	6,7
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	620	1.253	1.132	1.215	1.077

Tabla 9.5: Datos generales caso libre Chuquicamata

<b>División Radomiro Tomic</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral RT	kt/d	100	30	55	30	30
Mineral RT	kts	36.000	10.800	19.671	10.800	10.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Fino Cu RT	ktf	222	58	115	67	55
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Fino Mo RT	tf	2.387	541	1.693	756	540
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,6	0,2	0,3	0,2	0,2
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	654	171	338	197	161

Tabla 9.6: Datos generales caso libre Radomiro Tomic

En las tablas anteriores asociadas a la corrida libre, se observa que si solo se consideran restricciones de capacidad plantas y normativa ambiental, para el año 2013 se tiene que el óptimo es enviar el máximo posible desde Radomiro Tomic, esto es 100 kt/d, en cambio los años 2014, 2016 y 2017 el óptimo es enviar el máximo posible desde Chuquicamata, el único año que el óptimo es cercano a los 60 kt/d es el 2015 que envió 55 kt/ a las plantas concentradoras.

La razón del aumento de envío de Radomiro Tomic el año 2015 a pesar que Chuquicamata presenta mejores leyes se explica por la alta ley de Arsénico que Chuquicamata tiene ese año, 0,043% As, y para cumplir la normativa de emisiones se requiere que Radomiro Tomic aumente su envío para diluir la mezcla. La siguiente tabla muestra la normativa ambiental y las emisiones estimadas para este escenario.

		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Normativa	ton As/año	800	800	600	600	600
Factor de emisión	%	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Emisión	ton As/año	303	608	600	534	242

Tabla 9.7: Emisiones corrida libre

En la tabla anterior se aprecia como el año 2015 con la mezcla simulada se obtienen los 600 ton As/año, cualquier otra mezcla que considere menos envío de Radomiro Tomic a cuenta de subir Chuquicamata, significará no cumplir la normativa ambiental.

En la tabla que se muestra a continuación con los resultados de la corrida libre, se aprecia que al modificar la razón de envíos desde Chuquicamata y Radomiro Tomic existe una ganancia actualizada de 103 millones de dólares respecto a la situación base.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.192	2.134	1.816	1.911	1.642
Ingreso Mo Ch	MUS\$	171	325	338	381	247
Ingreso Cu RT	MUS\$	1.475	341	636	362	288
Ingreso Mo RT	MUS\$	64	16	37	17	15
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	207	383	321	383	383
Gasto Mina RT	MUS\$	83	25	45	25	25
Gasto CH	MUS\$	469	848	711	848	848
Gasto RT	MUS\$	359	101	183	101	101
Ingreso CH RT	MUS\$	2.902	2.816	2.827	2.671	2.191
Gasto CH RT	MUS\$	827	949	894	949	949
beneficio	MUS\$	2.075	1.867	1.933	1.722	1.242
Actualizado		<b>7.168</b>				
Diferencial sobre base		<b>103</b>				

Tabla 9.8: Resultados corrida libre

Un análisis de los excedentes de concentrados de la corrida libre, como se observa en la Tabla 9.9, indica primero que al aumentar los envíos de Chuquicamata el As ponderado de la mezcla aumenta de 1,05 a 1,22 el año 2014, por lo que habría que gestionar con la Fundición de Potrerillos que pidiese procesar 314 kts de concentrado con una calidad de 1,22 % As.

Ahora si se considera la separación de plantas, la disminución del envío de Radomiro Tomic, hace que su concentrado generado sea menor al total de excedentes por que de todas maneras hay que buscar una solución con Potrerillos para los excedentes de Chuquicamata, que para el caso del año 2016 serían 205 kts de ley 1,24% de As.



		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	620	1.253	1.132	1.215	1.077
AsCo Chuquicamata	%	1,30	1,37	1,49	1,24	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	654	171	338	197	161
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,10	0,10	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.274	1.424	1.471	1.412	1.238
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	314	461	402	228
Asco ponderado	%	-	1,22	1,17	1,1	0,6

Tabla 9.9: Excedentes de concentrado corrida libre

Se deben explorar diferentes alternativas, como son consolidar el tema asociado a la separación de líneas, realizar las gestiones con las fundiciones de la corporación y tercero evaluar opciones de considerar aumentos de capacidad de fusión en Chuquicamata, abriéndose a analizar el tema de cartera mixta (ánodos-eje/metal blanco) para los años que presenten mayor dificultad.

Otro análisis que se realizó fue preguntarse, qué sucede si a esta corrida libre se le agrega la restricción que la ley de Arsénico ponderada sea la misma que la establecida en el Plan de Negocios de esta manera la gestión, en el caso que se necesite, con las fundiciones de la corporación no sería por calidad, solo por cantidad.

Al agregar la restricción de igualar el Arsénico ponderado al valor del Plan de Negocios, se obtiene que para el 2013 sigue siendo óptimo enviar el máximo desde Radomiro Tomic, los años 2014, 2015 y 2016 el envío óptimo es 122 kt/d de Chuquicamata y 60 kt/d de Radomiro Tomic, igualando lo establecido en el Plan de Negocios, el año 2017 cuando disminuye la ley de As en Chuquicamata el envío óptimo vuelve a maximizar Chuquicamata.

<b>División Chuquicamata</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral Ch	kt/d	82	122	122	122	152
Mineral Ch	kts	29.520	43.943	43.924	43.920	54.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	87,8	87,1	87,3	86,7	86,5
Fino Cu Ch	ktf	180	292	315	283	312
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	6.341	8.995	14.719	13.910	9.137
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	8,1	13,8	16,1	12,1	6,7
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	620	1.006	1.085	975	1.077

Tabla 9.10: Datos generales Chuquicamata corrida igualando AsCo

<b>División Radomiro Tomic</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral RT	kt/d	100	60	60	60	30
Mineral RT	kts	36.000	21.577	21.596	21.600	10.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Fino Cu RT	ktf	222	116	126	134	55
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Fino Mo RT	tf	2.387	1.080	1.858	1.512	540
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	654	341	371	393	161

Tabla 9.11: Datos generales Radomiro Tomic corrida igualando AsCo

En la tabla que muestra los resultados económicos de la corrida que iguala el Arsénico en concentrado, se aprecia que al aumentar el envío de Radomiro Tomic los años 2014, 2015 y 2016 se pierde valor respecto a la corrida libre, no obstante sigue siendo mejor que la situación base al aumentar el envío de Radomiro Tomic el año 2013 a 100 kt/d y disminuirlo el 2017 a 30 kt/d.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.192	1.714	1.740	1.534	1.642
Ingreso Mo Ch	MUS\$	171	261	324	306	247
Ingreso Cu RT	MUS\$	1.475	682	698	725	288
Ingreso Mo RT	MUS\$	64	31	41	33	15
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	207	308	307	307	383
Gasto Mina RT	MUS\$	83	50	50	50	25
Gasto CH	MUS\$	469	681	681	681	848
Gasto RT	MUS\$	359	201	201	201	101
Ingreso CH RT	MUS\$	2.902	2.688	2.803	2.598	2.191
Gasto CH RT	MUS\$	827	882	882	882	949
beneficio	MUS\$	2.075	1.806	1.921	1.716	1.242
Actualizado		7.101				
Diferencial sobre base		36				

Tabla 9.12: Resultados corrida igualando AsCo

El análisis de la corrida igualando el Arsénico en el concentrado al Plan de Negocios indica un aumento en el beneficio actualizado de 36 millones de dólares, explicado principalmente por la ganancia de aumentar el envío desde Radomiro Tomic el año 2013 a 100 kt/d.

Respecto a los excedentes de concentrados esta corrida mantiene las calidades del Plan de Negocios en lo que respecta al Arsénico, por otra parte en caso de considerar la separación de líneas, todos los años salvo el 2015 los excedentes son menores a la generación de concentrado Radomiro Tomic, por lo que los excedentes son comerciales, si bien el 2015 todavía se generan excedentes Chuquicamata del orden de 75 kts son perfectamente gestionables de manera interna y/o con las fundiciones de la corporación. La siguiente tabla da cuenta del comportamiento de los excedentes de concentrados para la corrida mencionada.

		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	620	1.006	1.085	975	1.077
AsCo Chuquicamata	%	1,30	1,37	1,49	1,24	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	654	341	371	393	161
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,10	0,10	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.274	1.347	1.456	1.369	1.238
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	237	446	359	228
Asco ponderado	%	-	1,05	1,13	0,9	0,6

Tabla 9.13: Excedentes de concentrado corrida igualando AsCo

Un ejercicio adicional que se realizó fue agregar una restricción asociada al proyecto quinto molino de bolas en la sección A2 de molienda SAG, con la implementación de este proyecto se espera aumentar la recuperación de cobre en cuatro puntos porcentuales (con un máximo de 88%) y la recuperación molibdeno en tres puntos porcentuales (con un máximo de 60%), con ello se busca mejorar el rendimiento del mineral de Radomiro Tomic en la planta A2.

Con respecto a la simulación anterior se observa un cambio en el envío los años 2016 y 2017 donde Radomiro Tomic copa la capacidad de la planta A-2 y aprovechando al máximo de recuperación que entrega el proyecto.

El hecho que se priorice Radomiro Tomic en la planta A-2 de molienda SAG va en concordancia con el proyecto separación de líneas que se ha comentado en los análisis anteriores.

<b>División Chuquicamata</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral Ch	kt/d	82	123	124	102	102
Mineral Ch	kts	29.520	44.223	44.468	36.720	36.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	87,8	87,1	87,3	86,7	86,5
Fino Cu Ch	ktf	180	294	318	237	210
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	6.341	9.052	14.901	11.630	6.132
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	8,1	13,9	16,3	10,1	4,5
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	620	1.012	1.098	816	722

Tabla 9.14: Datos generales Chuquicamata corrida quinto molino

<b>División Radomiro Tomic</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral RT	kt/d	100	59	58	80	80
Mineral RT	kts	36.000	21.297	21.052	28.800	28.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	85,0	86,5	88,0	88,0	88,0
Fino Cu RT	ktf	222	117	127	185	151
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	53,00	55,00	55,00	55,00
Fino Mo RT	tf	2.387	1.130	1.993	2.218	1.584
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,6	0,4	0,3	0,5	0,5
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	654	343	375	543	444

Tabla 9.15: Datos generales Radomiro Tomic corrida quinto molino

Esta alternativa como se observa en la siguiente tabla presenta un aumento considerable en el beneficio actualizado respecto a la situación base de 116 millones de dólares, proporcionado principalmente por el aumento de ingresos producto de la diferencia de recuperación de cobre y molibdeno y del óptimo de envío del año 2013 al aumentar el envío de Radomiro Tomic por sobre Chuquicamata.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.192	1.725	1.761	1.282	1.102
Ingreso Mo Ch	MUS\$	171	263	328	256	166
Ingreso Cu RT	MUS\$	1.475	685	705	1.000	794
Ingreso Mo RT	MUS\$	64	33	44	49	43
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	207	310	311	257	257
Gasto Mina RT	MUS\$	83	49	49	67	67
Gasto CH	MUS\$	469	685	689	569	569
Gasto RT	MUS\$	359	198	196	268	268
Ingreso CH RT	MUS\$	2.902	2.705	2.838	2.587	2.105
Gasto CH RT	MUS\$	827	884	885	837	837
beneficio	MUS\$	2.075	1.821	1.952	1.750	1.267
Actualizado		<b>7.181</b>				
Diferencial sobre base		<b>116</b>				

Tabla 9.16: Resultados corrida quinto molino

En lo que respecta a los excedentes de concentrados esta alternativa al enviar 80 kt/d los años 2016 y 2017 genera un excedente de concentrado limpio esos años debido a que es de Radomiro Tomic y al igual que el caso anterior el año 2015 se genera una porción menor de concentrado excedente de Chuquicamata del orden de 88 kts que puede ser gestionado de manera interna o externa.

Debido a que se tomo como referencia la simulación anterior también genera los primeros años una calidad de concentrado en términos de Arsénico equivalente al caso referente del Plan de Negocios.

		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	620	1.012	1.098	816	722
AsCo Chuquicamata	%	1,30	1,37	1,49	1,24	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	654	343	375	543	444
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,10	0,09	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.274	1.355	1.473	1.358	1.167
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	245	463	348	157
Asco ponderado	%	-	1,05	1,13	0,8	0,4

Tabla 9.17: Excedentes de concentrado corrida quinto molino

Un ejercicio adicional que se realizó corresponde a visualizar si la a decisión se cambia al obtenerse recuperaciones más bajas en la concentradora, por esta razón arbitrariamente se realizaron las simulaciones con recuperaciones de 86% para Chuquicamata y de 83% para Radomiro Tomic.

Para ello se genera un nuevo referente que considera la situación base con la recuperación de Cobre y Molibdeno corregidas, que para el caso de la División Chuquicamata queda de la siguiente manera.

<i>División Chuquicamata</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral Ch	kt/d	122	122	122	122	122
Mineral Ch	kts	43.920	43.920	43.920	43.920	43.920
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
Fino Cu Ch	ktf	262	288	310	281	249
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,3	58,1	63,8	64,4	63,0
Fino Mo Ch	tf	9.434	8.990	14.718	13.910	7.334
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	12,0	13,8	16,1	12,1	5,4
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	904	993	1.068	968	860

Tabla 9.18: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación

Análogamente, para Radomiro Tomic lo cálculos de producción de la situación base se observan en la siguiente tabla.

<b>División Radomiro Tomic</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral RT	kt/d	60	60	60	60	60
Mineral RT	kts	21.600	21.600	21.600	21.600	21.600
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0
Fino Cu RT	ktf	130	113	123	131	107
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Fino Mo RT	tf	1.432	1.081	1.859	1.512	1.080
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	383	334	363	384	314

Tabla 9.19: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación

Con las condiciones planteadas anteriormente la nueva situación base entrega un beneficio actualizado de 6.912 millones de dólares, lo que se traduce en una pérdida del 2,2 % respecto a la situación base con las recuperaciones planificadas, este 2,2% equivale a 153 millones de dólares.



		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.738	1.692	1.713	1.522	1.311
Ingreso Mo Ch	MUS\$	255	261	324	306	198
Ingreso Cu RT	MUS\$	864	667	682	708	562
Ingreso Mo RT	MUS\$	39	31	41	33	29
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	307	307	307	307	307
Gasto Mina RT	MUS\$	50	50	50	50	50
Gasto CH	MUS\$	697	681	681	681	681
Gasto RT	MUS\$	215	201	201	201	201
Ingreso CH RT	MUS\$	2.896	2.650	2.760	2.569	2.100
Gasto CH RT	MUS\$	912	882	882	882	882
beneficio	MUS\$	1.983	1.769	1.878	1.687	1.218
Actualizado		<b>6.912</b>				

Tabla 9.20: Resultados sensibilización recuperación

Esta situación base corregida por recuperación al igual que la original en el caso de existir la separación de plantas los excedentes de concentrado generalmente serían provenientes de Ramiro Tomic a excepción del año 2014 donde se generaría una cantidad de excedentes Chuquicamata que deben ser gestionados interna o externamente debido a su alto contenido de impurezas.

		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	904	993	1.068	968	860
AsCo Chuquicamata	%	1,33	1,39	1,51	1,25	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	383	334	363	384	314
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,11	0,10	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.287	1.327	1.431	1.352	1.174
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	217	421	342	164
Asco ponderado	%	-	1,07	1,15	0,9	0,5

Tabla 9.21: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación

Para el caso de la corrida libre se toma como base la situación anterior y se busca el óptimo envío de minerales, solo restringido al cumplimiento de la norma ambiental y los máximos envíos permitidos.

<i>División Chuquicamata</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral Ch	kt/d	82	152	127	152	152
Mineral Ch	kts	29.520	54.720	45.849	54.720	54.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
Fino Cu Ch	ktf	176	359	323	350	311
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	6.341	11.200	15.364	17.331	9.137
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	8,1	17,2	16,8	15,1	6,7
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	607	1.237	1.115	1.206	1.071

Tabla 9.22: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida libre

En la tabla anterior se aprecia la variabilidad de los envíos de Chuquicamata, manteniendo la tendencia de la situación original, donde el año 2013 el óptimo indica disminuir el envío de Chuquicamata mientras que Radomiro Tomic ese mismo año envía su máximo permitido.

<i>División Radomiro Tomic</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral RT	kt/d	100	30	55	30	30
Mineral RT	kts	36.000	10.800	19.671	10.800	10.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0
Fino Cu RT	ktf	217	57	112	65	53
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Fino Mo RT	tf	2.387	541	1.693	756	540
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,6	0,2	0,3	0,2	0,2
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	639	167	330	192	157

Tabla 9.23: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida libre

Como complemento a los envíos de Chuquicamata, Radomiro Tomic solo el año 2015 indica un óptimo cercano a los 60 kt/d.

Como resultado de las simulaciones de la corrida libre se aprecia que el óptimo de envíos encontrado entrega un beneficio adicional de 111 millones de dólares.

En lo que respecta a los excedentes de concentrados, al disminuir el envío de Radomiro Tomic, hace que se obtengan mayores cantidades de excedente de concentrados y de una calidad no comercial, debido principalmente al contenido de impurezas del mineral de Chuquicamata.

En las siguientes tablas se aprecia el beneficio económico de la simulación y los excedentes de concentrados generados.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.168	2.108	1.788	1.896	1.633
Ingreso Mo Ch	MUS\$	171	325	338	381	247
Ingreso Cu RT	KUS\$	1.440	333	621	354	281
Ingreso Mo RT	KUS\$	64	16	37	17	15
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	207	383	321	383	383
Gasto Mina RT	MUS\$	83	25	45	25	25
Gasto CH	MUS\$	469	848	711	848	848
Gasto RT	MUS\$	359	101	183	101	101
Ingreso CH RT	MUS\$	2.844	2.782	2.785	2.647	2.176
Gasto CH RT	MUS\$	827	949	894	949	949
beneficio	MUS\$	2.017	1.833	1.891	1.699	1.227
Actualizado		<b>7.023</b>				
		<b>111</b>				

Tabla 9.24: Resultados sensibilización recuperación corrida libre

		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	607	1.237	1.115	1.206	1.071
AsCo Chuquicamata	%	1,33	1,39	1,51	1,25	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	639	167	330	192	157
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,11	0,10	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.246	1.404	1.445	1.398	1.228
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	294	435	388	218
Asco ponderado	%	-	1,24	1,19	1,1	0,6

Tabla 9.25: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación corrida libre

Una dificultad de la corrida anterior tiene relación al aumento de la cantidad de Arsénico contenido en concentrado respecto a la situación base, lo que implica una mayor gestión en masa y calidad de los concentrados.

Para evitar la situación anterior se agregó una restricción para igualar el arsénico contenido en concentrado considerado en el Plan de Negocios, con ello se genera una nueva simulación que entrega envíos que cumplan con restricción anterior.

De esta manera los envíos de Chuquicamata y Radomiro Tomic se presentan a continuación.

<i>División Chuquicamata</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral Ch	kt/d	82	119	119	120	152
Mineral Ch	kts	29.520	42.983	42.847	43.217	54.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
Fino Cu Ch	ktf	176	282	302	276	311
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	6.341	8.798	14.358	13.688	9.137
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	8,1	13,5	15,7	11,9	6,7
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	607	972	1.042	952	1.071

Tabla 9.26: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida igualando AsCo

De las tablas de envíos óptimo de Chuquicamata y Radomiro Tomic, se aprecia que al agregar la restricción de calidad de concentrado, los envíos se acercan bastante a la razón 122/60 planificada, no obstante sigue manteniéndose la oportunidad para los años 2013 y 2017.

<i>División Radomiro Tomic</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral RT	kt/d	100	63	63	62	30
Mineral RT	kts	36.000	22.537	22.673	22.303	10.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0
Fino Cu RT	ktf	217	118	129	135	53
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Fino Mo RT	tf	2.387	1.128	1.951	1.562	540
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	639	348	381	396	157

Tabla 9.27: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida igualando AsCo

Al agregar restricciones el beneficio se reduce a 26 millones de dólares, pero el caso de negocios sigue vigente para el año 2013, lo que indica que bajo este escenario es necesario realizar las gestiones para ir a captar el potencial de beneficio que se genera en la corrida libre.

Los volúmenes de concentrado que se generan en esta alternativa son perfectamente manejables con el proyecto de separación de líneas concentradoras, puesto que la generación de excedentes de concentrados es menor que la producción de concentrados de Radomiro Tomic, salvo el año 2015 que requiere de una gestión interna o externa con las fundiciones de la corporación para ser tratados.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.168	1.656	1.671	1.497	1.633
Ingreso Mo Ch	MUS\$	171	255	316	301	247
Ingreso Cu RT	MUS\$	1.440	695	716	731	281
Ingreso Mo RT	MUS\$	64	33	43	34	15
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	207	301	300	303	383
Gasto Mina RT	MUS\$	83	52	52	52	25
Gasto CH	MUS\$	469	666	664	670	848
Gasto RT	MUS\$	359	210	211	208	101
Ingreso CH RT	MUS\$	2.844	2.639	2.746	2.563	2.176
Gasto CH RT	MUS\$	827	876	875	878	949
beneficio	MUS\$	2.017	1.763	1.871	1.686	1.227
Actualizado	<b>6.938</b>					
	<b>26</b>					

Tabla 9.28: Resultados sensibilización recuperación corrida igualando AsCo

		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	607	972	1.042	952	1.071
AsCo Chuquicamata	%	1,33	1,39	1,51	1,25	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	639	348	381	396	157
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,11	0,10	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.246	1.320	1.423	1.349	1.228
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	210	413	339	218
Asco ponderado	%	-	1,05	1,13	0,9	0,6

Tabla 9.29: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación corrida igualando AsCo

Al ejercicio original se analizó el efecto de la implementación del proyecto quinto molino de bolas que permite aumentar la recuperación a contar del segundo semestre del año 2012, como este proyecto se implementa en la planta de molienda SAG A2, que tiene una capacidad de 80.000 t/d, este aumento de recuperación se hace solo sobre esta

fracción de mineral. Con la restricción o condición de recuperación sobre las 80 kt/d se obtienen los siguientes envíos óptimos para Chuquicamata y Radomiro Tomic.

<b>División Chuquicamata</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral Ch	kt/d	82	120	121	102	102
Mineral Ch	kts	29.520	43.373	43.604	36.720	36.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
Fino Cu Ch	ktf	176	284	308	235	208
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	6.341	8.878	14.612	11.630	6.132
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	8,1	13,6	16,0	10,1	4,5
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	607	981	1.060	809	719

Tabla 9.30: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida quinto molino

<b>División Radomiro Tomic</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral RT	kt/d	100	62	61	80	80
Mineral RT	kts	36.000	22.147	21.916	28.800	28.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	83,0	85,0	87,0	87,0	87,0
Fino Cu RT	ktf	217	119	131	182	149
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	53,00	55,00	55,00	55,00
Fino Mo RT	tf	2.387	1.175	2.074	2.218	1.584
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	639	350	386	536	439

Tabla 9.31: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida quinto molino

Con la incorporación de esta restricción, se aprecia en las tablas anteriores que el aumento de recuperación levantó el mineral de Radomiro Tomic los años 2016 y 2017 copando la planta A2 de molienda SAG, con esto se logra obtener un beneficio

actualizado de 126 millones de dólares respecto al base bajo la condición que fue concebida esta simulación.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.168	1.671	1.701	1.272	1.096
Ingreso Mo Ch	MUS\$	171	257	321	256	166
Ingreso Cu RT	MUS\$	1.440	700	725	989	785
Ingreso Mo RT	MUS\$	64	34	46	49	43
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	207	304	305	257	257
Gasto Mina RT	MUS\$	83	51	51	67	67
Gasto CH	MUS\$	469	672	676	569	569
Gasto RT	MUS\$	359	206	204	268	268
Ingreso CH RT	MUS\$	2.844	2.662	2.793	2.566	2.090
Gasto CH RT	MUS\$	827	878	880	837	837
beneficio	MUS\$	2.017	1.784	1.913	1.729	1.253
Actualizado		<b>7.038</b>				
Diferencial sobre base		<b>126</b>				

Tabla 9.32: Resultados sensibilización recuperación corrida quinto molino

El aumento de envíos de Radomiro Tomic facilita la venta de excedentes de concentrados debido a la calidad de éstos, no obstante el 2015 continúa con el requerimiento de realizar gestiones para dar solución a los excedentes de Chuquicamata que se generan.

		2013	2014	2015	2016	2017
Concentrado Chuquicamata	kts	607	981	1.060	809	719
AsCo Chuquicamata	%	1,33	1,39	1,51	1,25	0,63
Concentrado Radomiro Tomic	kts	639	350	386	536	439
AsCo Radomiro Tomic	%	0,09	0,10	0,09	0,09	0,11
Concentrado Total	kts	1.246	1.331	1.446	1.346	1.158
Capacidad fundición	kts	1.550	1.550	1.450	1.450	1.450
Calcina DMH	kts	-	440	440	440	440
Capacidad Fundición disponible	kts	-	1.110	1.010	1.010	1.010
Excedentes de Concentrado	kts	-	221	436	336	148
Asco ponderado	%	-	1,05	1,13	0,8	0,4



Tabla 9.33: Excedentes de concentrado sensibilización recuperación corrida quinto molino

Como resumen las corridas que se realizaron, a continuación se presentan tablas comparativas de las simulaciones en las dos condiciones generales.

	<b>Beneficio Actualizado Respecto Base</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Base	0	Envío Chuquicamata	122	122	122	122	122
		Envío RT	60	60	60	60	60
		Beneficio	2.039	1.806	1.921	1.716	1.239
Libre	103	Envío Chuquicamata	82	152	127	152	152
		Envío RT	100	30	55	30	30
		Beneficio	2.075	1.867	1.933	1.722	1.242
AsCo	36	Envío Chuquicamata	82	122	122	122	152
		Envío RT	100	60	60	60	30
		Beneficio	2.075	1.806	1.921	1.716	1.242
5° Molino	116	Envío Chuquicamata	82	123	124	102	102
		Envío RT	100	59	58	80	80
		Beneficio	2.075	1.821	1.952	1.750	1.267

Tabla 9.34: Tabla resumen de simulaciones con recuperación planificada

En la tabla anterior se aprecia el potencial que existe al modificar los envíos de mineral a las plantas concentradoras, este potencial de 100 millones de dólares puede ser superior si se analizan otras variables que permiten optimizar la ley al disminuir los envíos de Chuquicamata a las plantas concentradoras.

A continuación se presenta una tabla con el resumen de las simulaciones asociadas a la sensibilización de las recuperaciones de Cobre y Molibdeno.

<b>Sensibilidad Recuperación</b>	<b>Beneficio Actualizado Respecto Base</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Base	0	Envío Chuquicamata	122	122	122	122	122
		Envío RT	60	60	60	60	60
		Beneficio	1.983	1.769	1.878	1.687	1.218
Libre	111	Envío Chuquicamata	82	152	127	152	152
		Envío RT	100	30	55	30	30
		Beneficio	2.017	1.833	1.891	1.699	1.227
AsCo	26	Envío Chuquicamata	82	119	119	120	152
		Envío RT	100	63	63	62	30
		Beneficio	2.017	1.763	1.871	1.686	1.227
5° Molino	126	Envío Chuquicamata	82	120	121	102	102
		Envío RT	100	62	61	80	80
		Beneficio	2.017	1.784	1.913	1.729	1.253

Tabla 9.35: Tabla resumen de simulaciones con disminución de recuperación

Al considerar recuperaciones más bajas en relación a lo planificado, las tendencias se mantienen a pesar que el beneficio disminuye en 10 millones de dólares aproximadamente.

De las tablas de resumen anteriores, se observa que la oportunidad mayor se encuentra en la revisión del año 2013

Los resultados presentados concuerdan con la solución gráfica presentada en la siguiente ilustración.

Donde se observa que la capacidad nominal de la planta es cruzada por las restricciones que se van agregando según sea el año a considerar, en ella podemos visualizar el espacio factible y los bordes corresponden a la solución óptima, la curva limitación As se corre según sean las leyes de As y la normativa ambiental de cada año.

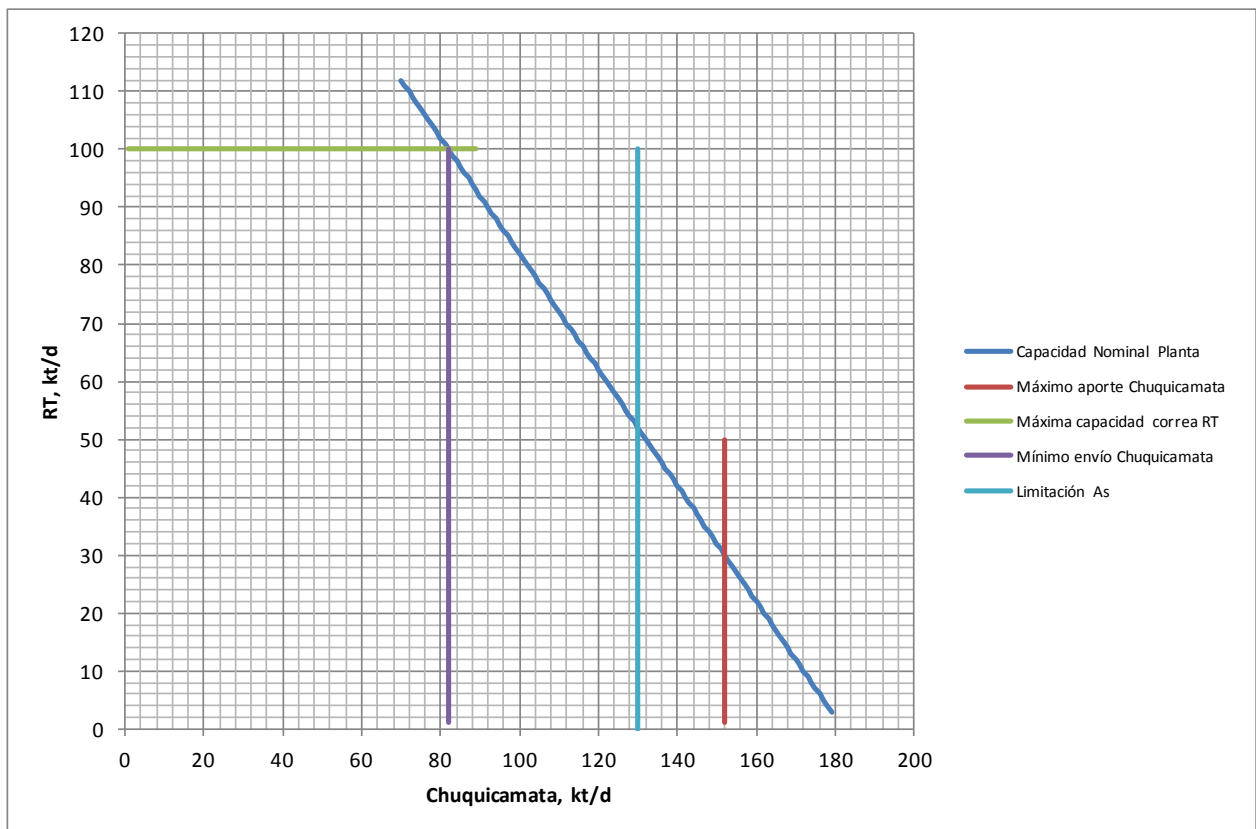


Ilustración 9.1: Solución gráfica

Una sensibilidad realizada a la simulación 5° Molino que aparece en la Tabla 9.36, consiste en considerar que la capacidad máxima de la correa es 80 kt/d, sustentada en los valores máximos que se le ha exigido en su periodo de operación, con esto el óptimo para el año 2013 de 100 kt/d se baja a 80 kt/d quedando dentro del espacio factible pero fuera del óptimo.

A continuación en se presentan los resultados de esta simulación.

<b>División Chuquicamata</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral Ch	kt/d	102	120	121	102	102
Mineral Ch	kts	36.720	43.373	43.604	36.720	36.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0
Fino Cu Ch	ktf	219	284	308	235	208
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	7.888	8.878	14.612	11.630	6.132
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	10,0	13,6	16,0	10,1	4,5
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	755	981	1.060	809	719

Tabla 9.36: Datos generales Chuquicamata sensibilización recuperación corrida quinto molino, límite 80 kt/d en capacidad correa

<b>División Radomiro Tomic</b>		<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Mineral RT	kt/d	80	62	61	80	80
Mineral RT	kts	28.800	22.147	21.916	28.800	28.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	83,0	85,0	87,0	87,0	87,0
Fino Cu RT	ktf	174	119	131	182	149
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	53,00	55,00	55,00	55,00
Fino Mo RT	tf	1.910	1.175	2.074	2.218	1.584
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	511	350	386	536	439

Tabla 9.37: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización recuperación corrida quinto molino, límite 80 kt/d en capacidad correa

En la tabla anterior se aprecia como para el año 2013 se forzó el mineral de Radomiro Tomic a enviar 80 kt/d a planta concentradora y no los 100 kt/d que enviaba en la situación óptima.

En la tabla que se muestra a continuación se aprecia la pérdida de valor al modificar el envío desde Radomiro Tomic a las plantas concentradoras el año 2013.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.453	1.671	1.701	1.272	1.096
Ingreso Mo Ch	MUS\$	213	257	321	256	166
Ingreso Cu RT	MUS\$	1.152	700	725	989	785
Ingreso Mo RT	MUS\$	52	34	46	49	43
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	257	304	305	257	257
Gasto Mina RT	MUS\$	67	51	51	67	67
Gasto CH	MUS\$	583	672	676	569	569
Gasto RT	MUS\$	287	206	204	268	268
Ingreso CH RT	MUS\$	2.870	2.662	2.793	2.566	2.090
Gasto CH RT	MUS\$	870	878	880	837	837
beneficio	MUS\$	2.000	1.784	1.913	1.729	1.253
Actualizado		7.023				
Diferencial sobre base		111				

Tabla 9.38: Resultados sensibilización recuperación corrida quinto molino, límite 80 kt/d en capacidad correa

Se observa que existe una pérdida de 15 millones de dólares al modificar el envío de Radomiro Tomic el año 2013 de 100 kt/ a 80 kt/d, con esto, si bien se reduce el beneficio al salirse del óptimo, se gana en disminuir el riesgo de cumplimiento del plan.

Un análisis adicional que se realizó consistió en evaluar el efecto de razón costos fijos-variables sobre los resultados obtenidos, para ello se consideraron los datos de la Tabla 8.3, donde se consideraron para el año 2013 como gasto fijo las remuneraciones, otros materiales y servicios de terceros sumando un monto de 177.008 millones de dólares de gasto fijo en relación al gasto total de 475.094 millones de dólares con esto se obtiene un porcentaje de fracción fija de 37% para el caso de Chuquicamata.

A continuación se muestra una tabla con la proporción de gasto fijo utilizada para el trienio.

% gasto fijo	2013	2014	2015
Chuquicamata	37	35	30
Radomiro Tomic	35	30	25

Tabla 9.39: Proporción de gasto fijo

En la tabla anterior se muestra el criterio utilizado para realizar esta sensibilización, donde se va bajando gradualmente la proporción de gasto fijo dado que existe una

capacidad de gestión en el tiempo, adicionalmente se observa que Radomiro Tomic presenta una fracción de gasto fijo levemente inferior a Chuquicamata.

Los resultados de esta simulación se reflejan en las siguientes tablas, donde se aprecia que no existen diferencias en la decisión si se considera para este caso la razón fijo variable mencionada anteriormente, este ejercicio se compara con los resultados de la simulación 5° molino de la Tabla 9.34

<i>División Chuquicamata</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral Ch	kt/d	82	123	124	102	102
Mineral Ch	kts	29.520	44.223	44.468	36.720	36.720
Ley Cu Ch	%	0,69	0,76	0,82	0,74	0,66
Rec Cu Ch	%	87,8	87,1	87,3	86,7	86,5
Fino Cu Ch	ktf	180	294	318	237	210
Ley Mo Ch	%	0,037	0,035	0,053	0,049	0,027
Rec Mo Ch	%	58,33	58,11	63,75	64,37	63,01
Fino Mo Ch	tf	6.341	9.052	14.901	11.630	6.132
Ley As Ch	%	0,032	0,037	0,043	0,032	0,015
Rec As Ch	%	85	85	85	85	85
Fino As Ch	ktf	8,1	13,9	16,3	10,1	4,5
Ley Cu concentrado	%	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Concentrado	kts	620	1.012	1.098	816	722

Tabla 9.40: Datos generales Chuquicamata sensibilización razón de gasto fijo-variable

<i>División Radomiro Tomic</i>		2013	2014	2015	2016	2017
Mineral RT	kt/d	100	59	58	80	80
Mineral RT	kts	36.000	21.297	21.052	28.800	28.800
Ley Cu RT	%	0,73	0,63	0,69	0,73	0,60
Rec Cu RT	%	85,0	86,5	88,0	88,0	88,0
Fino Cu RT	ktf	222	117	127	185	151
Ley Mo RT	%	0,013	0,010	0,017	0,014	0,010
Rec Mo RT	%	50,00	53,00	55,00	55,00	55,00
Fino Mo RT	tf	2.387	1.130	1.993	2.218	1.584
Ley As RT	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Rec As RT	%	83	83	83	83	83
Fino As RT	ktf	0,6	0,4	0,3	0,5	0,5
Ley Cu concentrado	%	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0
Concentrado	kts	654	343	375	543	444

Tabla 9.41: Datos generales Radomiro Tomic sensibilización razón de gasto fijo-variable

Los resultados en términos de beneficio se comparan en la siguiente tabla.

		2013	2014	2015	2016	2017
Precio Cu	cUS\$/lb	367	325	306	300	291
Precio Mo	US\$/kg	30	32	25	25	30
Ingreso Cu Ch	MUS\$	1.192	1.725	1.761	1.282	1.102
Ingreso Mo Ch	MUS\$	171	263	328	256	166
Ingreso Cu RT	MUS\$	1.475	685	705	1.000	794
Ingreso Mo RT	MUS\$	64	33	44	49	43
CU Mina CH	US\$/t	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CU Mina RT	US\$/t	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
CU ConcCH	US\$/t	8,9	8,5	8,5	8,5	8,5
CU Conc RT	US\$/t	7,7	7,0	7,0	7,0	7,0
Gasto MinaCH	MUS\$	207	310	311	257	257
Gasto Mina RT	MUS\$	83	49	49	67	67
Gasto CH	MUS\$	511	685	689	569	569
Gasto RT	MUS\$	334	198	196	268	268
Ingreso CH RT	MUS\$	2.902	2.705	2.838	2.587	2.105
Gasto CH RT	MUS\$	845	884	885	837	837
beneficio	MUS\$	2.058	1.821	1.952	1.750	1.267
Actualizado		7.165				
Diferencial sobre base		100				

Tabla 9.42: Resultados sensibilización razón gasto fijo-variable

Los resultados nos muestran que al considerar una fracción de gasto fijo de 37%, 35% y 30% para Chuquicamata y 35%, 30% y 25% para Radomiro Tomic la decisión de envío se mantiene en enviar 100 kt/d de mineral a las plantas concentradoras el 2013 desde Radomiro Tomic no obstante se pierden 16 millones de dólares respecto a la situación que considera los gastos 100% variable.

## 10.0 Conclusiones y recomendaciones

De los resultados anteriores se concluye que existe un caso de negocios al analizar la razón de envíos de mineral a las plantas concentradoras de Chuquicamata, si bien existe un potencial de 100 millones de dólares de beneficio actualizado, se hace necesario realizar un estudio más detallado que implique abordar el efecto de variación de leyes al modificar los envíos.

Para el año 2013 se observa que el óptimo envío corresponde a copar la capacidad de la correa de Radomiro Tomic con 100 kt/d de este mineral, para ello se hace necesario analizar las implicancias que podría tener en recuperación estos volúmenes de mineral en la planta concentradora de Chuquicamata.

De los resultados se concluye que un envío variable, dependiendo de las características del mineral en relación al comportamiento en las plantas concentradoras y a la normativa ambiental, agrega más valor al negocio integrado que un envío promedio anual fijo.

En relación a las restricciones, no se consideró el contenido de insolubles en el concentrado por lo que se requiere analizar, en particular para los años que Radomiro

Tomic aumenta su envío a las plantas concentradoras, los valores resultantes de insolubles ya que es sabido que Radomiro Tomic hace aumentar estos valores con los consiguientes problemas que acarrea en la fundición de concentrados.

La mirada distrital que se plantea en relación al llenado de plantas hace necesario revisar los sistemas de evaluación de desempeño ya que el cobre fino divisional empuja la búsqueda de óptimos locales en desmedro del óptimo global.

El análisis debe considerar además que ambas minas tengan el desarrollo minero que le permita a ambas divisiones iniciar la operación de sus proyectos estructurales como son la mina subterránea en el año 2018 para la División Chuquicamata y RT fase II en 2016 para la División Radomiro Tomic.

Si bien la capacidad de la correa desde Radomiro Tomic a las plantas concentradoras de Chuquicamata tiene una capacidad de 100 kt/d y en todas las simulaciones resultó que el año 2013 el óptimo es enviar este máximo a Chuquicamata, una sensibilización razonable es considerar que el máximo operativo es 80 kt/d saliéndose del óptimo pero quedando dentro del espacio factible, los resultados de este análisis mostraron una pérdida de 15 millones de dólares respecto a la situación óptima, pero disminuyendo el riesgo de incumplimiento del plan.

## **11.0 Bibliografía**

### **ANTECEDENTES ECONÓMICOS Y COMERCIALES PARA PLANIFICACIÓN 2013**

- GERENCIA DE ESTUDIOS Y DISEÑO ESTRATÉGICO, CODELCO.
- Antecedentes económicos y comerciales para planificación 2013
- Chile, Codelco
- Codelco
- 2012

### **FORMULACIÓN Y RESOLUCIÓN DE MODELOS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA EN INGENIERÍA Y CIENCIA**

- CASTILLO, ENRIQUE; CONEJO, ANTONIO; PEDREGAL, PABLO; GARGÍA, RICARDO; ALGUACIL, NATALIA
- Formulación y resolución de modelos de programación matemática en ingeniería y ciencia.
- 2002
- 574 páginas

### **INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES**

- TAHA, HAMDY A.
- Investigación de Operaciones
- 9ª. edición
- México
- Pearson Educación
- 2012
- 824 páginas

### **MEMORIA ANUAL 2010**

- CODELCO CHILE
- Memoria Anual 2010
- Chile, Codelco
- Codelco
- 2011