



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

**METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN
DE ANÁLISIS ESTOCÁSTICOS PARA PLANES
DE CORTO PLAZO EN LA MINERÍA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

JOSÉ HERIBERTO DE JESÚS LÓPEZ LEDESMA

**PROFESOR GUÍA:
JUAN GUZMÁN BARROS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ENRIQUE SILVA RAMOS
SARA ARANCIBIA CARVAJAL**

**SANTIAGO DE CHILE
2023**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:
Magíster en Gestión y Dirección de Empresas.
POR:** José Heriberto de Jesús López Ledesma
FECHA: 2023
PROFESOR GUÍA: Juan Guzmán Barros

METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ANÁLISIS ESTOCÁSTICOS PARA PLANES DE CORTO PLAZO

Los ciclos de planificación de corto plazo en minería están referidos al proceso de planificación y programación de la producción en un horizonte de tiempo relativamente corto, generalmente de semanas o meses. Estos ciclos incluyen varias etapas de trabajo, como la recolección y análisis de *inputs*, la evaluación de capacidad de los equipos, definición de tasas de producción y/o extracción, y la elaboración y difusión de sus resultados a la organización. Comúnmente, se asume que las variables utilizadas para la confección de aquel plan seguirán un comportamiento de acuerdo con lo planificado (o comprometido) a lo largo del horizonte de tiempo. Sin embargo, aquí entran a jugar los conceptos de “variabilidad” e “incertidumbre” que rodean la planificación misma, y que en concreto demuestran que lejos de cumplir un plan de manera previsible (perspectiva determinística del plan), estos se pueden comportar bajo ciertos niveles de variabilidad.

Es por lo anterior que el objetivo central de esta tesis es proponer una metodología en complemento a la mirada convencional que incorpore a los ciclos de planificación de corto plazo el concepto de “incertidumbre” con especial enfoque en la producción de concentrado de cobre (que representa la principal línea productiva de la compañía en estudio), enfocándose fundamentalmente en un elemento central: La utilización de un mecanismo de simulación enfocado en el nivel de riesgo del plan, en base a la variabilidad de los principales *inputs* que definen el resultado y junto con ello establecer rangos de certidumbre tanto en volumen como calidad de la producción de concentrado de cobre.

Con este objetivo en mente, se desarrolló un diagnóstico del uso de este tipo de metodologías en una compañía minera productora de cobre, y se propusieron mejoras al modelo disponible que contaba con las potencialidades necesarias para validar los aspectos de esta tesis. Una vez hechos los ajustes necesarios al modelo, fue posible establecer rangos de probabilidad de producción de concentrado en volumen y calidad, para el plan disponible. Para efectos de corroborar el desempeño del modelo de simulación, se hizo un *back* análisis para un periodo de 10 meses de producción para efectos de comprobar los rangos productivos previstos por este modelo de simulación. Luego de esto se abordó un caso de aplicación que consiste en simular bajo la herramienta RAC¹ rangos de producción de concentrado probables para un periodo de 10 meses con el objeto de “recomendar” la cantidad óptima de naves a planificar. Al momento de comparar con la forma convencional y con el resultado real alcanzado, demostró un valor potencial, en términos de ahorro en costos por *demurrage*² cercanos a los \$kUSD 800 para el periodo analizado. Finalmente se proponen una serie de recomendaciones desde lo táctico y organizacional para la implementación de esta metodología en los ciclos de trabajo actuales.

¹ Modelo “Risk Assessment Concentrate” diseñado en la herramienta Crystall Ball y adaptado para simular producción y calidad de concentrado de cobre en la compañía minera.

² *Cargos por mantener naves (barcos) por no cargar o descargar en un periodo acordado.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mi familia, Ignacia, José, hermanos e hijos por el Amor y el apoyo incondicional, el equipo de Operaciones Integradas Escondida | BHP, amigos, colegas, y profesionales del MBA Industria Minera.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes básicos y necesidad	2
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 CONTEXTO	4
3.1 Contexto Operativo	4
3.2 Ciclos de planificación de corto plazo	4
3.3 Cadenas de valor del ciclo de planificación de corto plazo.....	5
3.4 Inputs y Outputs principales del ciclo de planificación de concentrado.....	6
4 METODOLOGÍA DE TRABAJO	7
4.1 Simulación como herramienta en procesos productivos.....	7
4.2 Presentación general del problema.....	8
4.3 Metodología propuesta producción de concentrado.....	8
5 CONCEPTUALIZACION DEL MODELO Y DIAGNÓSTICO EN EL USO DE HERRAMIENTAS ESTOCÁSTICAS	11
5.1 Herramientas disponibles.....	12
6 DIAGNÓSTICO Y POTENCIALES MEJORAS AL MODELO EXISTENTE	15
6.1 Verificación operativa y de lógica del modelo.....	15
6.2 Funcionamiento lógico	16
6.3 Bases de datos y ajustes de distribución	16
6.4 Oportunidades y mejoras	18
7 APROXIMACIONES DE USO EN ALCANCES DE CORTO PLAZO Y PROPUESTA DE VALOR	20
8 SIMULACION ESTOCÁSTICA APLICADA A CASOS DE USO PRACTICO	22
8.1 Resultados obtenidos	22
8.2 Análisis y validación de resultados versus performance del sistema.....	24
8.2.1 Análisis resultados rango de producción de concentrado.....	25
8.2.2 Análisis resultados rango de calidad de concentrado producido	26
8.2.3 Opciones de Valor potencial capturable.....	27
8.2.4 Potenciales usos adicionales	29
9 RECOMENDACIONES DE IMPLEMENTACION EN CICLOS DE PLANIFICACION Y POTENCIALES MEJORAS	30
10 CONCLUSIÓN	33
11 BIBLIOGRAFIA	35
12 ANEXOS	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.	Matriz de decisión formal para selección de herramienta.....	14
Tabla II.	Distribuciones de probabilidad ajustada a variabilidad histórica versus plan de parámetros planta de los últimos 4 años.....	18
Tabla III.	GAP asociado a <i>runtime</i> versus gap total últimos 18 meses.....	18
Tabla IV.	Distribuciones de probabilidad ajustada a variabilidad histórica versus plan <i>runtime</i> planta de los últimos 4 años.....	19
Tabla V.	Rango de producción de concentrado total de 3 plantas simulada 12 meses, con 80% probabilidad.....	23
Tabla VI.	Rango de calidad de concentrado total de 3 plantas simulada 12 meses, con 95% probabilidad.....	24
Tabla VII.	Comparación rango estocástico vs producción real alcanzada para 10 meses de producción.....	25
Tabla VIII.	Errores de pronóstico entre metodología determinística y estocástica comparado con <i>performance</i> real.....	26
Tabla IX.	Estimación estocástica de naves por mes vs naves planificadas.....	28

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración i.	Incerteza y variabilidad de parámetros productivos	2
Ilustración ii.	Horizontes de planificación	5
Ilustración iii.	Procesos en los ciclos CP	5
Ilustración iv.	Secuencia metodológica de simulación.....	9
Ilustración v.	Confiabilidad del plan propuesto	10
Ilustración vi.	Esquema de etapas productivas consideradas en el modelo	16
Ilustración vii.	Rango de concentrado total producido para el mes M1 con 80% probabilidad.....	23
Ilustración viii.	Rango de calidad esperada para el mes M1 con 95% probabilidad.....	24
Ilustración ix.	Rango de calidad esperada vs calidad real de 10 meses	26
Ilustración x.	Distribución del gasto por <i>demurrage</i> según causa raíz	27

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.	Rango de producción concentrado mes M1.....	36
Anexo B.	Rango de producción concentrado mes M2	36
Anexo C.	Rango de producción concentrado mes M3.....	36
Anexo D.	Rango de producción concentrado mes M4.....	36
Anexo E.	Rango de producción concentrado mes M5.....	36
Anexo F.	Rango de producción concentrado mes M6.....	36
Anexo G.	Rango de producción concentrado mes M7.....	37
Anexo H.	Rango de producción concentrado mes M8	37
Anexo I.	Rango de producción concentrado mes M9.....	37
Anexo J.	Rango de producción concentrado mes M10.....	37
Anexo K.	Rango de producción concentrado mes M11.....	37
Anexo L.	Rango de producción concentrado mes M12.....	37
Anexo M.	Cuestionario de diagnóstico uso de herramientas estocásticas.....	38

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de producción en minería no es más que la consecuencia lógica, estudiada y programada de considerar un universo de factores técnicos, económicos y operativos, que pueden ser propios del yacimiento (geología, variables geo-metalúrgicas, calidad geotécnica y geo-estructural, etc.) como también externos a éste (mercado, precios de la especie mineral de interés, precios insumos, etc.), de tal manera que la interacción de estos afectan elementos fundamentales como el diseño de la explotación, secuencia de extracción, decisiones de inversión, etc.

Una vez que se ha determinado, en base al estudio y recopilación de los antecedentes necesarios, una estrategia de producción que involucre la definición de un diseño y plan minero, se asume que las variables utilizadas para la confección de aquel plan seguirán un comportamiento de acuerdo a lo planificado a lo largo del horizonte de tiempo. Sin embargo, aquí entran a jugar los conceptos de “variabilidad” e “incertidumbre” que rodean la planificación misma, y que en concreto demuestran que lejos de cumplir un plan de manera previsible, estos se comportan bajo ciertos niveles de variabilidad, la que puede o no corresponder al “target” fijado por el plan, tal como expresa conceptualmente en la Ilustración i.

Y en cualquiera de los distintos procesos productivos (mina, concentración, hidrometalurgia, etc.) el ambiente de trabajo dista de ser completamente previsible, por lo que sus fenómenos se deben plantear y resolver como si estuvieran en un ambiente impredecible, según plantea Guzmán (2019).

Contar con una medida de robustez para planes de corto plazo, se ha transformado en una necesidad cada vez más relevante para el negocio, teniendo en cuenta que a partir de este tipo de ejercicios se definen metas de productivas, compromisos de venta, presupuestos y expectativas de retorno a sus accionistas, etc.

Es por esto que el presente estudio busca proponer una metodología que incorpore a los ciclos de planificación de corto plazo el concepto de “incertidumbre” con especial enfoque en la producción de concentrado (que representa la principal línea productiva), enfocándose fundamentalmente en un elemento central: La utilización de un mecanismo de simulación enfocado sobre la definición de probabilidad de cumplimiento del plan de producción anual, definiendo así el nivel de riesgo asumido en el mismo, en base a la variabilidad de los principales inputs que definen el resultado y junto con ello establecer rangos de certidumbre tanto en volumen como calidad de la producción de concentrado. Junto con ello, se establecerá un diagnóstico en el uso y aplicación de herramientas de este tipo, y la implementación de un caso práctico que tiene el objeto de demostrar el valor potencial del uso en ciclos de planificación de corto plazo.

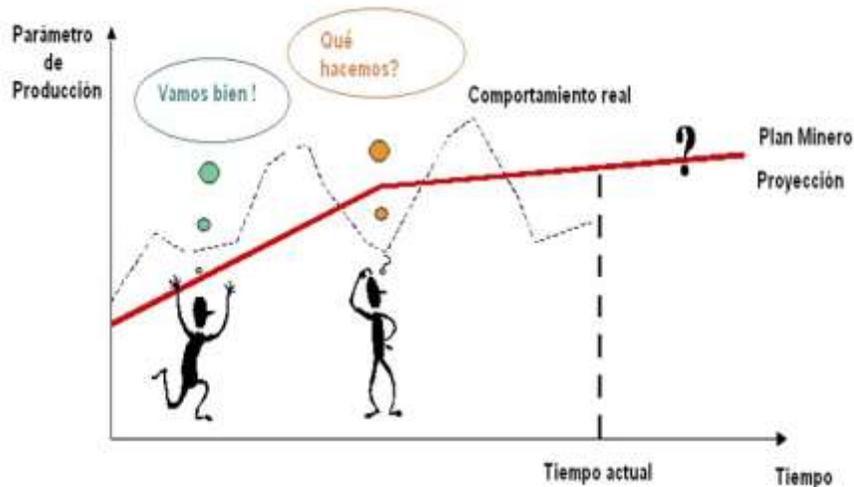


Ilustración i. Incerteza y variabilidad de parámetros productivos

1.1 Antecedentes básicos y necesidad

Esta propuesta nace a partir de la evaluación de calidad a los ciclos de planificación de producción de una empresa de la gran Minería en Chile, que determinó, entre varias mejoras identificadas, la necesidad de reconocer y cuantificar el riesgo asumido en los ejercicios de planificación de producción de corto plazo, además de utilizar estas herramientas para reconocer la variabilidad del output del plan. Si bien en los ciclos de planificación de largo plazo existen diversas aproximaciones que, de alguna forma, introducen conceptos estocásticos que ayudan a comprender el riesgo de inputs y outputs del plan, en la práctica hoy no existe una metodología implementada y operando, que permita entender este mismo proceso en ciclos de menor horizonte temporal.

Incluir principios estocásticos en los ejercicios de planificación de corto plazo con una metodología que permita reconocer la variabilidad e incertidumbre de los inputs relevantes del ciclo de planificación y así también considerar sus efectos sobre el resultado del plan, es en definitiva una expectativa en la línea de establecer una medida objetiva de robustez del plan, tal como se ha avanzado en la última década a partir de trabajos de Blom M.& Pearce A.R. (2019) y Dimitrakopoulos R (2020) con enfoque en programación open pit en corto plazo. Además, esta tesis incluirá un análisis desde el punto de vista operativo-funcional que permite entender la intensidad de uso de estas herramientas y, por último, se compartirá un caso de uso propuesto que tiene el objetivo de evidenciar el potencial valor en su implementación.

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de proporcionar a los equipos de planificación de corto plazo, evidenciar el valor del uso de metodologías

estocásticas a partir de técnicas de simulación enfocados en determinar la variabilidad del plan de producción de concentrado, permitiendo lo siguiente:

1. Representar, mediante un modelo de simulación, aspectos claves de la producción de concentrado en un ciclo de planificación de corto plazo (plan trimestral, anual), considerando la variabilidad e incertidumbre de los *inputs* relevantes del ejercicio (operacionales y mantenimiento).
2. Generar planes de producción más robustos y con riesgo “cuantificado”, lo cual permitiría identificar un rango de escenarios posibles, establecer estrategias de producción específicas y/o levantar planes de mejoramiento con foco en vulnerabilidades o cuellos de botellas detectados.

2. OBJETIVOS

El desarrollo de este estudio contempla el logro de los siguientes objetivos fundamentales:

2.1 Objetivo general

1. Proponer mediante un enfoque estocástico y en particular mediante técnicas de simulación una metodología necesaria para el desarrollo de planes de producción con el valor matemático – lógico de representar la futura respuesta de los sistemas simulados de forma práctica y válida.

2.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar una metodología práctica e integrada a los ciclos y rutinas de planificación de producción de corto plazo, en particular de concentrado, que permita pronosticar mediante modelos de simulación, el riesgo asumido en el plan de producción de concentrado propuesto (rangos de volumen y calidad)
2. Proponer esta metodología como una herramienta de soporte a los equipos de planificación para ajustar, iterar o mejorar planes de producción entregando soluciones que consideren esta variabilidad.
3. Establecer una lógica de implementación tomando en contexto las fortalezas y debilidades del ciclo de trabajo actual.
4. Proponer casos de potencial valor capturable mediante este tipo de metodología.

3. CONTEXTO

3.1 Contexto Operativo

Este trabajo de tesis centra su investigación en una empresa productora de cobre perteneciente al grupo de la Gran Minería del Cobre en Chile, produciendo fundamentalmente concentrado de cobre mediante el proceso de flotación de mineral sulfurado (cerca de un 75%-80% de la producción total) y cátodos de cobre mediante los procesos de lixiviación de mineral oxidado y sulfuros de baja ley.

Su infraestructura consiste en dos minas a rajo abierto, tres líneas de producción de concentrado que en total procesan sobre las 380 ktpd de mineral, una planta de electro-obtención para producir cátodos a partir de mineral oxidado, el proceso de biolixiviación de sulfuros, y dos concentraductos que transportan el concentrado de cobre desde la mina hasta la planta de filtros, ubicada en un puerto a aproximadamente 200km de distancia de la operación principal.

3.2 Ciclos de planificación de corto plazo

El ciclo de planificación minera es aquel ciclo lógico que se ejecuta durante la vida del proyecto minero y que busca responder la pregunta: ¿Cómo y cuándo se van a extraer las reservas?

Generalmente este ciclo comprende tres etapas paralelas y cada una abarca las actividades de explotación para periodos de tiempo distintos, se habla entonces de Planificación de corto, mediano y Largo plazo. En estas etapas se planifican las actividades a realizar en función de la explotación misma del yacimiento, políticas de la compañía (necesidades, recursos, intereses, etc.), influencia de agentes internos (índices de seguridad, huelgas, ambiente laboral, bono, etc.) y externos a la empresa (mercado, regulaciones, normativas, impuestos, etc.).

En el caso particular de esta compañía existen a grandes rasgos 4 horizontes que conforman el ciclo de planificación, las cuales son:

1. LOA/LOM (Plan de vida de la mina).
2. Plan quinquenal (Plan de cinco años).
3. Forecast (Plan trimestral hasta bianual).
4. Bisemanal.

La ejecución de cada uno de estos planes es llevada, en general, a cabo por distintas áreas de la compañía, las que desarrollan uno a uno las etapas que dan vida al ciclo de

planificación (Ver Ilustración ii). Entre cada una de ellas, aparece un ente que integra, alinea y coordina los distintos procesos que ocurren en el ciclo y es en definitiva el *accountable* del plan productivo. Esta área corresponde a la GIP (Gerencia Integrada Operaciones).

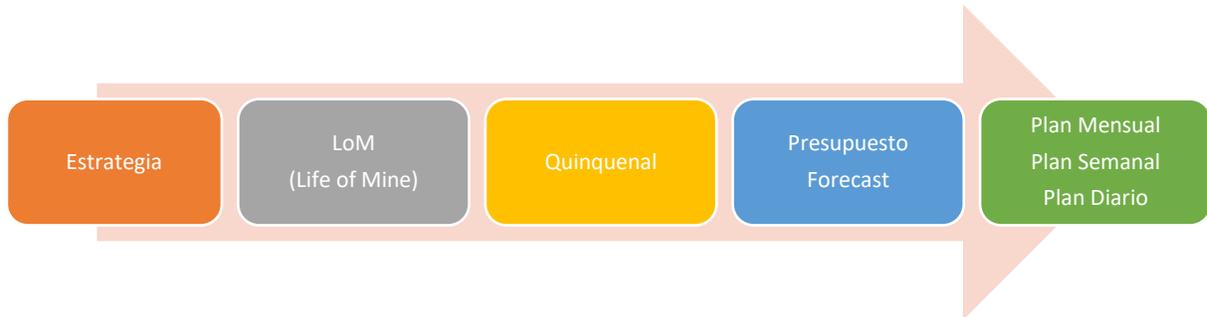


Ilustración ii. Horizontes de planificación

3.3 Cadenas de valor del ciclo de planificación de corto plazo

Los ciclos de planificación de corto plazo (horizonte < 2 años) tienen como principal objetivo ser el detalle del “cómo” va a funcionar la cadena de valor de la compañía, mientras que el LOA y plan quinquenal representa el “qué”.

Los ciclos de corto plazo (trimestral, bisemanal) deben definir la secuencia, temporalidad, oportunidades, riesgos y recursos requeridos para cumplir con el compromiso adquirido en los ciclos de nivel superior vigente siguiendo los principios que guían el Modelo Operativo de la compañía en análisis. En la Ilustración iii se explicitan los procesos que típicamente se incluyen en los ciclos de corto plazo.

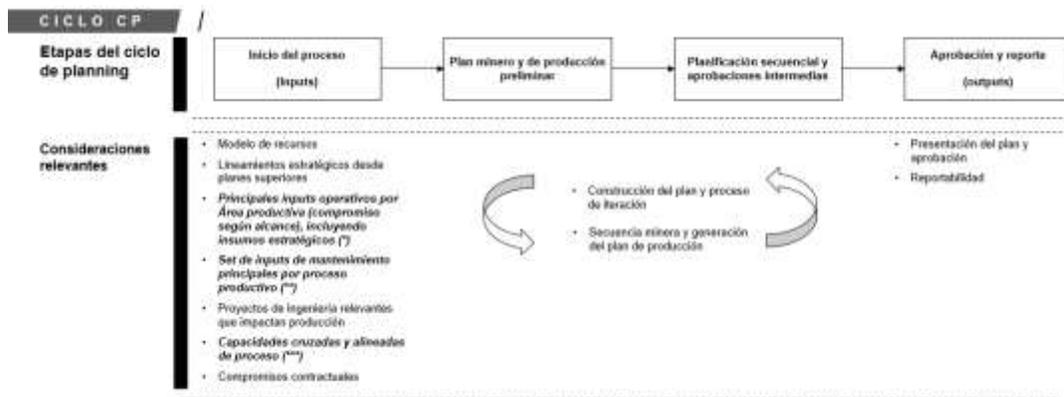


Ilustración iii. Procesos en los ciclos CP (Fuente: Elaboración propia)

Hacer notar que una de las características más relevantes de este ciclo, es que los parámetros involucrados como inputs del proceso no consideran la variabilidad de estos, por lo tanto, la ejecución del plan y los outputs siguen esta misma lógica determinística, que por lo demás es el enfoque convencional de este tipo de ejercicios.

3.4 *Inputs* y *Outputs* principales del ciclo de planificación de concentrado

Como se mencionó previamente, este trabajo de tesis se enfocará principalmente en el ciclo de planificación de producción de concentrado de cobre, por ende, de la producción de cobre contenido. La compañía posee tres plantas concentradoras, las que procesan en su conjunto del orden de 380 ktpd de mineral, produciendo anualmente del orden del 80%-85% del total compañía. En cuanto a la planificación de la producción, este ciclo tiene entre sus principales inputs los siguientes elementos:

1. Secuencia minera concentrado, minerales a ser alimentados por periodo (los que incluyen leyes de Cu, Fe, Cu en concentrado, durezas, modelo de rendimiento por hora, modelo de recuperación etc.).
2. Horas de mantenimiento de equipos principales (SAGs, Molinos de bolas, chancadores de pebbles, líneas de flotación, espesadores de concentrado y relave).
3. Plan de capacidades aguas arriba y aguas abajo en una lógica integrada (incluyendo capacidades de línea de alimentación mina-chancado y correas, plan de suministro de agua desalada). Esto quiere decir que hay un cruce de capacidades que garantice la definición global del sistema y no de forma unitaria por cada proceso productivo.
4. Imprevistos planificados de equipo (en función de tallas de fallas esperadas para equipos principales).
5. Imprevistos operacionales (en función de fallas de alimentación o restricción aguas abajo).
6. Otros (eventos climáticos).

Por otro lado, los *outputs* del plan de producción de concentrado son básicamente:

1. Producción de concentrado de cobre (dmt) por periodo (días, semanas, meses).
2. Calidades del concentrado (% Cu, elementos pagables y penalizables).
3. Cu fino contenido (t Cu) por periodo.

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 Simulación como herramienta en procesos productivos

En enfoque de esta tesis buscará fundamentalmente a partir de herramientas de simulación incorporar los conceptos planteados en el Capítulo 1. La simulación es una técnica para analizar y estudiar sistemas complejos. Nos permite reunir información pertinente sobre el comportamiento del sistema ejecutado a partir de un modelo computarizado.

Los datos recopilados se usan después para diseñar el sistema. Según Koutsoyiannis (2005) se puede definir la Simulación “Como la técnica que imita el funcionamiento de un sistema del mundo real cuando evoluciona en el tiempo”. La simulación no es una técnica de optimización, más bien es una técnica para estimar las medidas de desempeño del sistema modelado.

Un modelo de simulación comúnmente toma la forma de un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresado como relaciones matemáticas o lógicas entre los objetivos de interés del sistema. En contraste con las soluciones matemáticas el proceso de simulación incluye la ejecución del modelo computacional, que genera muestras representativas de las medidas del desempeño, como un experimento de muestreo acerca del sistema real cuyos resultados son puntos de muestra.

De lo anterior, se resume que la idea que está detrás de la simulación es:

1. Imitar matemáticamente una situación del mundo real.
2. Estudiar sus propiedades y características de operación.
3. Llegar a conclusiones y tomar decisiones de acción basadas en los resultados de la simulación.

Desde hace algunas décadas, la simulación ha ido adquiriendo una creciente relevancia en el ámbito industrial y de servicios, como una herramienta de análisis y consulta de diversos sistemas productivos. Esta ha sido identificada como un poderoso apoyo en la toma de decisiones, ya que permite evaluar el desempeño de un proceso real frente a distintas situaciones de operación, sin alterarlo físicamente, con el objetivo de detectar los problemas que afectan al sistema y determinar las soluciones a estos.

Como se explicó anteriormente, la simulación, como un método de análisis, experimenta con sistemas reales sin alterarlos físicamente. Esta contradicción aparente, es posible gracias a la utilización de modelos del sistema, sobre los cuales se realizan los experimentos. Donde un modelo es una descripción lógica de cómo se comporta un sistema, proceso o componente.

4.2 Presentación general del problema

Los ciclos de planificación de corto plazo de la compañía analizada, son gestionados de forma convencional siguiendo una lógica determinística, desde la concepción de los *inputs* hasta la entrega del plan. Las dudas sobre, ¿qué tan cumplible es este plan? ¿Qué tan variable puede ser la producción esperada, pensando en la variabilidad propia del proceso? no tiene una respuesta muy clara y en muchas ocasiones deja un manto de razonable duda respecto sus resultados, tanto en quienes lo confeccionan (planificadores), los clientes de este y quienes deben aprobarlo.

Hay diversas aproximaciones al respecto que han hecho esfuerzos en la planificación de largo plazo, con enfoque en modelo de recursos, secuencia de extracción, etc. pero sin mucha atención en ciclos de menor horizonte; por lo que este estudio pretende recomendar una metodología para la incorporación de la medición de incertidumbre en el ciclo de planificación de producción de cobre en concentrado, otorgando una herramienta de medición de robustez a los ciclos de planificación de corto plazo y proponiendo algunas aproximaciones que permitan generar valor sobre este horizonte de planificación.

El objetivo es considerar las herramientas y modelos actualmente disponibles, tomando en cuenta además las rutinas y modelo organizacional del ciclo de planificación y eventualmente proponiendo algunas mejoras a lo ya existente.

4.3 Metodología propuesta producción de concentrado

La propuesta de trabajo consiste en una serie de pasos y tareas consecutivas relacionadas entre sí, tal como se muestra en la Ilustración iv. Para esto es fundamental formular el problema indicando, de manera general, su naturaleza y los objetivos a alcanzar. Esto corresponde de alguna manera a las etapas que hasta este punto han sido planteadas en capítulos previos de este trabajo.

El siguiente paso consiste en la conceptualización del modelo, lo que implica abstraer el sistema real a un modelo que describa todos sus elementos, características e interacciones, identificando las variables críticas (*inputs* y *outputs*), además de los datos necesarios para la construcción. Previo a esto, se plantea hacer un levantamiento que permita constatar la existencia de modelos vigentes, que permita hacer un diagnóstico acabado de la situación actual y en base a lo anterior, hacer o no los ajustes que resulten pertinentes para los objetivos de esta investigación.



Ilustración iv. Secuencia metodológica de simulación (Fuente: Elaboración propia)

A continuación se realizará la recolección de los datos de entrada necesarios para la construcción (o ajuste) del modelo, ya predefinidos en la Sección 3.4. El objetivo es capturar la información histórica relevante desde fuentes validadas, dando pie al análisis de datos requerido para la posterior construcción de distribuciones. Para esta etapa será relevante considerar:

1. Granularidad temporal de los datos históricos.
2. Limpieza de datos *outliers*.
3. Capacidades nominales de principales equipos críticos.

Obtenidos los datos de entrada se procede a la configuración, construcción y/o ajuste del modelo de producción de concentrado, traduciéndolo a un modelo de simulación.

Terminando el modelo se procede a revisar a las etapas de validación y calibración, es decir, se debe determinar si el modelo construido representa fielmente al sistema de producción de concentrado, esto es, ¿refleja lo que se supone que debe representar?, ¿puede el modelo sustituir al sistema real para propósitos de experimentación? Esto se puede realizar comparando los resultados obtenidos de la ejecución de la simulación de este modelo con datos históricos del sistema real, observando cuanto difieren uno del otro. Cabe señalar que la simulación no entrega resultados exactos, sino que tendencias de comportamiento, por lo cual esta comparación no se debe realizar sólo con una ejecución del modelo. Naturalmente este es proceso de iteración continua que requerirá de sucesivas etapas de validación.

Validado el modelo, se procede a ejecutar la corrida de simulación, considerando para cada corrida el tiempo de simulación, la inicialización (tiempo de estabilización del sistema) el número de réplicas, o de corridas, que se ejecutarán para cada situación,

que en este caso permitirán establecer realizaciones aleatorias de capacidades, leyes, recuperaciones y en definitiva de la producción de cobre fino de cada planta concentradora.

Lo anterior permitirá en definitiva obtener:

1. Rangos de producción de concentrado por periodos.
2. Rangos de calidad de concentrado (% Cu) por periodos.

Establecer probabilidad de cumplimiento de plan determinístico (p50, p90, p10, etc.), según se indica en el ejemplo de la Ilustración v.

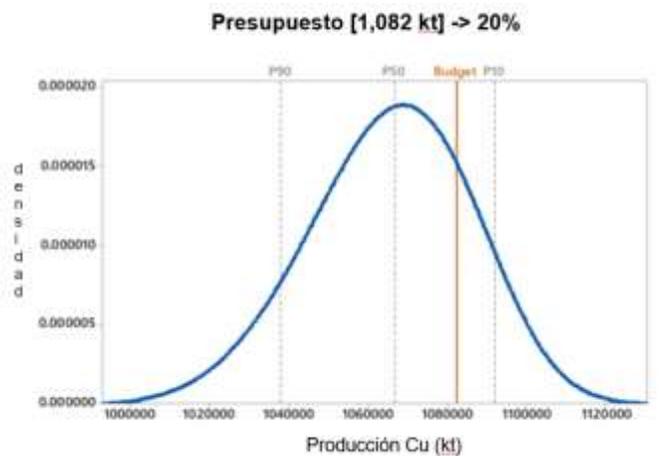


Ilustración v: Confiabilidad del plan propuesto (Fuente: Elaboración propia)

Una vez terminada la ejecución del modelo se realiza un análisis de los resultados obtenidos de ésta, midiendo aquellas variables críticas determinadas en la conceptualización del modelo y observando el comportamiento de cada una ellas, de lo cual se puede inferir, estadísticamente, como es el comportamiento y el desempeño del sistema.

Con los resultados ya analizados se pueden proponer algunas alternativas de solución a casos propuestos del sistema encontrados en la fase de análisis, y finalmente responder a los objetivos trazados en el estudio. Finalmente se propondrá un mecanismo de implementación en los ciclos y rutinas actuales.

5. CONCEPTUALIZACION DEL MODELO Y DIAGNÓSTICO EN EL USO DE HERRAMIENTAS ESTOCÁSTICAS

Los actuales ciclos de planificación de corto plazo de la compañía siguen un formato determinístico, es decir, los principales físicos de este ejercicio (*inputs* y *outputs*) corresponden a valores únicos, sin rangos de probabilidad de ocurrencia ni incertidumbre en sus parámetros. Puntualmente, ejercicios como el plan presupuesto de la compañía han introducido parcialmente elementos que permiten medir el riesgo del plan. Según plantea Siebert (2015), a diferencia de lo que ocurre en el corto plazo, en el largo plazo si existe una mayor intensidad de uso de este tipo de metodologías, principalmente desde un enfoque volatilidad precio (variable de incerteza) y su efecto en el secuenciamiento minero.

Lo cierto es que tanto los planificadores y ejecutivos en los diferentes niveles de la organización coinciden que existe valor en incorporar este concepto en la lógica de introducir una “medida de riesgo del plan” a través de un método estocástico para ciclos de corto plazo, no solamente puede aportar en la lógica de la medición del riesgo (probabilidad de cumplimiento) sino puede proveer aproximaciones para resolución de problemas de corto plazo que la metodología convencional no ha podido resolver. De acuerdo a Dimitrakopoulos (2011) finalmente el ciclo sigue siendo determinístico, aun cuando los enfoques convencionales de estimación de reserva, planificación y pronóstico de producción dan como resultado a pronósticos únicos, y a menudo, sesgados

Con el objetivo de tener una primera aproximación del uso que se tiene de este tipo de herramientas y metodologías en los ciclos de planificación de corto plazo, se desarrolló una primera encuesta a un grupo de interés focalizado (un total de 20 personas entre planificadores de producción y ejecutivos, relacionados a las áreas de planificación de corto plazo), en la que cada uno podía elegir entre 1 a 2 alternativas, resaltando los siguientes factores:

- a) Falta de tiempo/recurso (45%).
- b) Herramientas no disponibles (10%).
- c) Herramientas no conocidas (25%).
- d) No existe metodología implementada (20%).

Si bien buena parte de los entrevistados coincide que la aproximación en la elaboración del ciclo de producción deja muy poco espacio en tiempo para desarrollar un ejercicio estocástico es interesante que gran parte no conoce de la existencia de herramientas disponibles, o de frente no existe una metodología o ciclos de trabajo que permitan aplicarlo.

5.1 Herramientas disponibles

Como parte de la metodología propuesta, se realizó un levantamiento que incluyó la revisión de herramientas tecnológicas disponibles tanto para ciclos de planificación (en uso en mediano/largo plazo fundamentalmente) y como en los catálogos abiertos de la compañía.

Luego de esta revisión se pudo corroborar la existencia de las siguientes herramientas:

1. **Red de optimización logística y de infraestructura (ROLI):** Es una herramienta que hoy ya tiene modelado los procesos de la compañía y que permite simular y generar análisis de sensibilidad e incertidumbre sobre los planes mineros. Su enfoque primordial está en la secuencia de minado (*utilizando resultados de BLASOR*, software de optimización minera - para maximización de valor del LOM - cuyo concepto se basa en el uso de una secuencia óptima de extracción, para diseñar *pits* finales y fases mineras, no al revés como es el enfoque típico), pero también incluye modelación sobre los demás procesos productivos a un alto nivel. Permite análisis estocásticos de tipo direccional por lo que su uso está enfocado principalmente en ejercicios de planificación de mediano-largo plazo. Actualmente está soportado por un equipo externo a los equipos de planificación, en la casa matriz central, que tiene la misión de mantener actualizado el modelo en términos de funcionamiento lógico y bases de datos. Ha tenido un uso en planificación de largo plazo y mediano (LOM, quinquenal) y en pandemia permitió robustecer decisiones de planificación de 2 años. Es capaz de definir niveles de certeza de cumplimiento, pero no define rangos probables de producción esperada.
2. **Modelo capacidad concentradora (MCC):** Corresponde a una solución ya construida, que en base a una integración de una interface de usuario (User interface – assumption Management system), un modelo creado en *anylogic end to end plantas mine to port*, un gestor de data SQL Server y posterior visualización, permite hoy identificar:
 - a) **Detección de cuellos de botella**, Identificación cuellos de botella del sistema de producción de concentrado.
 - b) **Determinar probabilidad de cumplimiento del plan**, mediante la simulación de miles de simulaciones.

Elementos a favor de este modelo es que hoy ya tiene mapeado y bajo diseño la incorporación de datos de interés tales como planes de mantenimiento, *inputs* operacionales, diseños de equipos, data histórica y mapeo de principales reglas operacionales con un alto nivel detalle. Sin embargo, hoy tiene un rango de utilización bajo producto de aspectos de licencia, mantenimiento, e inexistencia de un modelo operativo en su administración (inexistencia de rol de operador del modelo, baja capacitación, etc.).

3. **Risk Assessment Concentrate (RAC):** Corresponde a un modelo estructurado en MS Excel y soportado a través de Crystal ball que contiene aspectos desde las características del mineral planificado a cada planta (incluyendo la variabilidad de parámetros geometalúrgicos claves como ley de alimentación, recuperación, ley de cobre en el concentrado y modelo de rendimiento SAG TPOH), variabilidad del *runtime* planta, planes de mantención y capacidades de las mismas, para poder responder la probabilidad de cumplimiento del plan y rangos de producción y calidad del concentrado producido esperado desde 1 mes hasta 24 meses de operación. Se cuenta con acceso al modelo, estructura lógica y bases de datos que son el soporte de su funcionamiento. Su intensidad de uso es puntual, pero tiene la ventaja de contar con libre accesibilidad al momento de hacer esta investigación.

Con el objetivo de seleccionar la herramienta y por ende el modelo sobre el cual se desarrollará este análisis, se proponen los siguientes criterios de decisión:

1. **Aplicabilidad a ciclos de corto plazo:** Como fue mencionado antes, el objetivo de esta tesis se centra en la implementación en ciclos de planificación de corto plazo, por tanto, es relevante testear su operatividad en este tipo de horizontes (con el detalle asociado).
2. **Modelo proceso de producción de concentrado:** El proceso a estudiar está enfocado en la producción de concentrado de cobre desde sus tres plantas. Es fundamental que la herramienta permita representar o ya tenga representado esta línea productiva con apropiado nivel de detalle. En este sentido las 3 herramientas tienen suficiente grado de representación de este proceso.
3. **Accesibilidad y estado de operación:** No todas las herramientas son de libre acceso y disposición. Evidentemente que esto pudiese ser una restricción a la hora de facilitar el desarrollo del estudio. De las 3 herramientas, solo RAC es aquella que permite hoy libre acceso, tanto a la lógica de construcción del modelo, bases de datos empleadas y da la facilidad de ejecutar ajustes de ser necesarios.

Con el objetivo de evaluar formalmente estos diferentes aspectos a la hora de seleccionar la herramienta sobre la cual se desarrollará el análisis, se plantea un cuadro de evaluación por cada criterio de decisión, bajo la siguiente nomenclatura:

- 0: Nula Adaptabilidad
- 1: Baja adaptabilidad.
- 2: Mediana adaptabilidad.
- 3: Avanzada adaptabilidad.

- a) **ROLI:** Si bien esta herramienta cuenta con una buena red de modelamiento de los diferentes procesos (incluyendo la producción de concentrado) y está conectado “end to end” desde la mina al puerto, su concepto está orientado a procesos de largo plazo y tiene el foco específico de identificación de cuellos de botella en horizontes de largo plazo. Por otro lado, la accesibilidad al modelo es baja, puesto que hoy no es operado directamente por la compañía, sino externamente. Hacer

ajustes como los planteados en esta tesis implicaría abordar un proyecto nuevo para esta herramienta con costos operacionales por determinar.

- b) MCC:** Al igual que la herramienta anterior, MCC tiene una completa red de modelamiento de los diferentes procesos con buen nivel de detalle, incluyendo las lógicas de proceso y reglas de negocio. Tiene la ventaja de poder responder a ciclos de corto plazo incluyendo análisis de cuello de botella. La dificultad de MCC radica en la posibilidad en que actualmente no cuenta con la suficiente mantenibilidad (soportado por empresa externa) y tiene una serie de restricciones que limitan la posibilidad de hacer ajustes al modelo que pudieran surgir como resultante del estudio. Por otro lado, no genera rangos de producción esperada, su alcance específico está en la determinación de cuellos de botella del proceso.
- c) RAC:** Como fue descrito anteriormente, esta herramienta tiene también completamente modelado el proceso de producción de concentrado end to end. Dado que se trata de un desarrollo interno de la compañía y es operado como tal, el acceso al modelo y sus lógicas solo requiere de la autorización interna del *key user* del mismo lo que es factible desde la corrida de un “proyecto” lo cual no implica hacer cambios materiales a su estructura. Tiene la capacidad de responder por rangos de producción, pero no por la identificación de cuellos de botella.

Basado en lo anterior, se construye una matriz de evaluación de las diferentes herramientas bajo los criterios de decisión propuestos, obteniendo así la Tabla i siguiente:

Herramienta \ Criterio	Aplicable a ciclos de corto plazo	Modelado proceso de producción de concentrado	Accesibilidad y estado de operación	Total
Red de optimización logística y de infraestructura (ROLI)	0	3	1	4
Modelo de capacidad concentradora (MCC)	3	2	2	7
Risk Assessment Concentrate (RAC)	3	3	3	9

Tabla i: Matriz de decisión formal para selección de herramienta

Considerando todos estos aspectos, se propone avanzar con la herramienta **RAC** (Risk assessment Concentrate), por su nivel de accesibilidad, modelo de libre acceso tanto en lógica como bases de datos utilizadas, contener la representación de la producción de concentrado de la compañía y proveer outputs en sintonía a los objetivos de esta tesis, lo cual permitirá evaluar casos de aplicación y propuestas de valor a fines.

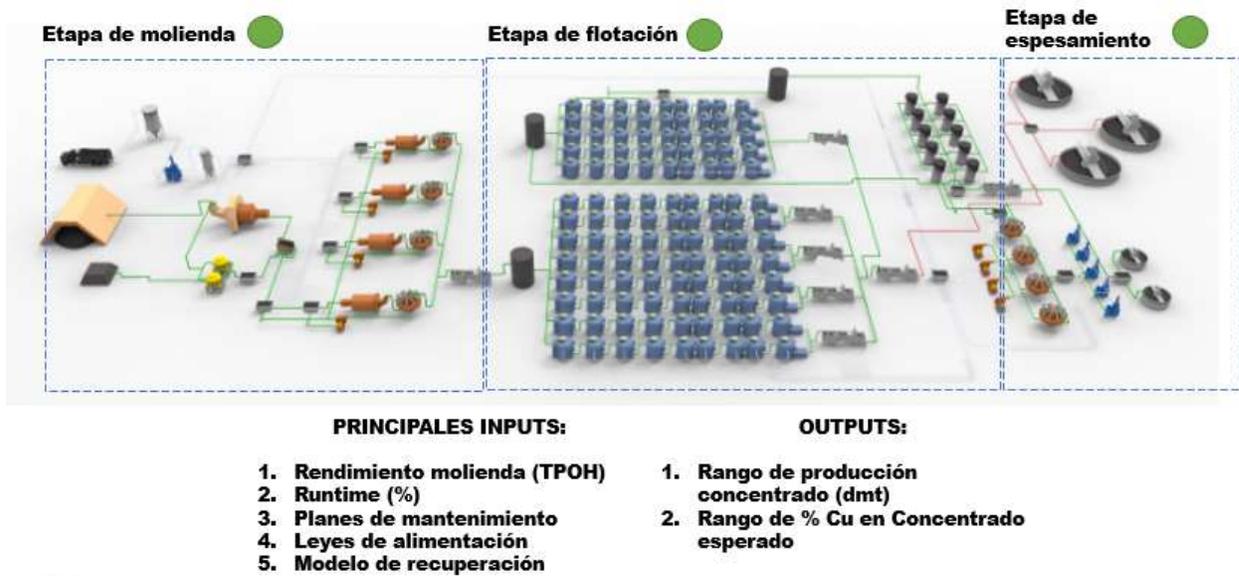
6 DIAGNÓSTICO Y POTENCIALES MEJORAS AL MODELO EXISTENTE

Como parte de la etapa de conceptualización del modelo propuesto en la metodología de trabajo, se encuentra diagnosticar el modelo actual y eventualmente proponer líneas de mejora en la sintonía de poder responder las interrogantes planteadas en los objetivos de esta investigación. En este sentido, el diagnóstico incluye etapas de verificación de lógicas de construcción, bases de datos existentes y proceso ajustes de distribuciones de probabilidad a *inputs* claves. Luego del diagnóstico se ejecutarán los ajustes y/o mejoras necesarias con miras a las corridas de simulación, y a la determinación de los análisis respectivos.

6.1 Verificación operativa y de lógica del modelo

Como parte de la revisión, fue posible verificar que las lógicas de proceso por planta estaban correctamente construidas, en una secuencia de determinación de producción de concentrado resultante de la operación de todas líneas de molienda por planta (SAG y molinos de bolas), proceso de flotación y espesamiento y transporte de concentrado, tal como se visualiza en el esquema de la Ilustración vi. En este aspecto, el modelo logra integrar adecuadamente:

- A) Rendimiento Molienda (TPOH, toneladas por hora efectiva):** Considera todos los efectos que tienen impacto en el rendimiento del sistema SAG/Molino de bolas, tales como tipo de material a procesar (dureza, granulometría, niveles de *stockpile*), disponibilidad de sistemas auxiliares como chancadores de pebbles, espesadores, molinos de Bolas, etc
- B) Runtime del sistema (%Tiempo productivo):** El modelo toma en consideración el *runtime* determinístico de cada planta, planes de mantenimiento, detenciones programadas de proceso (como consecuencia de interrupciones aguas arriba o abajo). Este es una de las potenciales mejoras del modelo, puesto que la adherencia a los *runtimes* planificados es una de las principales fuentes de variabilidad en el proceso actual.
- C) Recuperación planta (%):** Recuperación resultante de las etapas rougher y scavenger y que representa la eficiencia en la obtención de la especie de interés (En este caso Cu).
- D) Ley de concentrado (%Cu):** Corresponde al % Cu en el concentrado posible de alcanzar bajo las condiciones del mineral alimentado y operacionales de cada planta. Es un factor relevante, puesto que es la variable de principal peso en la definición de calidad del concentrado que produce esta compañía.
- E) Concentrado producido (dmt):** Toneladas en base seca posibles de producir en base mensual por planta y a nivel global desde las diferentes plantas productoras, en toneladas métricas secas.



Procesos unitarios considerados en el modelo

Ilustración vi: Esquema de etapas productivas consideradas en el modelo (Fuente: Presentación RAC)

6.2 Funcionamiento lógico

El modelo sigue una secuencia lógica en la que los *inputs* claves definidos mencionados en la Ilustración vi, son matemáticamente vinculados para estimar la producción de concentrado mensual y la calidad esperada por mes. Para esto, utiliza como base el plan de producción vigente (o el que se defina simular) que ya contiene las capacidades y disponibilidad del sistema. Luego considera para cada *input* distribuciones de probabilidad ajustadas a la variabilidad que ha presentado cada uno de los parámetros vs plan utilizando para esto bases de datos históricas (últimos 4 años) que permiten identificar esta variabilidad y por otro lado, mantener distribuciones de probabilidad para cada input y planta respectivamente (esto será profundizado posteriormente). A través del modelo ya establecido, se permiten correr hasta 10.000 corridas de simulación que permiten mensualmente establecer rangos de producción de concentrado esperados por mes con cierto % certeza, probabilidad de cumplimiento de producir desde cierto valor de concentrado (% Probabilidad cumplimiento plan) y rangos de calidad de concentrado (% Cu) esperado por mes. Todo este proceso es ejecutado en las mismas *spreadsheets* del plan de producción, a través de Crystal Ball.

6.3 Bases de datos y ajustes de distribución

El modelo tiene al momento de este diagnóstico bases de datos que son el punto de partida a la definición de distribución de probabilidad de las principales variables de

entrada. En este caso, considera ajustes de distribución y por ende fuente de variabilidad versus plan (pronóstico) para los siguientes parámetros:

- a) Rendimiento molienda TPOH por planta.
- b) Leyes de alimentación por planta.
- c) Recuperación metalúrgica por planta.

A nivel general, se trata de bases de datos estructuradas y vinculadas al desempeño real y sus planes de los últimos 4 años en base mensual, pero sin estar automatizadas. Esto significa que requiere de un “operador” que permanentemente deba actualizar las bases de datos y sus ajustes. Por otro lado, fue posible evidenciar que se trata de bases de datos que han depurado *data outlier* que representa un 15%, sobre todo en el periodo de pandemia donde la variabilidad vs plan fue completamente anormal y la detención de planta 1 por una mantención mayor (más de 1 mes de operación). Considerando lo anterior y de los usuarios que han interactuado con este modelo se desprende que está conceptualizado para representar el sistema bajo condiciones normales de operación sin considerar eventos “no controlables” en su resultado final.

Desde el punto de vista de los ajustes de distribución (ver anexos) básicamente está definido la siguiente secuencia de actividades:

- a) Se establecen factores de adherencia al plan entre el resultado real de la variable de intereses y el plan. Como ejemplo para el caso del rendimiento SAG de planta 1:

$$\text{Factor TPOH}_{\text{planta1}, n} = \text{TPOH}_{\text{real}, n} - \text{TPOH}_{\text{plan}, n}$$

Donde:

n: periodo (mes).

Factor TPOH planta 1: factor de rendimiento real – plan.

TPOH real, n: rendimiento (toneladas por hora) real del proceso de molienda, en el periodo “n”.

TPOH plan, n: rendimiento (toneladas por hora) planificado del proceso de molienda, en el periodo “n”.

- b) Sobre el resultado mensual de este factor, se establece una curva de ajuste de probabilidad al *set* de modelos disponibles en la herramienta, con el objetivo de poder representar la variabilidad de cumplimiento de la variable de interés disponibles en la bitácora de Crystal Ball. Para esto se utilizan los estadísticos de bondad de ajuste Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado al rango de datos (>50 observaciones mensuales) que representan la variabilidad real versus plan. Finalmente se verifican y seleccionan las distribuciones que presenten mejor bondad de ajuste (p-valor > 0,05, es decir se acepta $H_0 =$ Rango de datos se ajusta a distribución planteada). Luego de lo anterior fue posible verificar que cada factor de adherencia contaba con

la distribución de probabilidad a fin. Para efectos de dar cuenta de las curvas actualizadas, se presenta una tabla resumen con los parámetros de ajuste de distribución utilizadas en las variables de entrada al modelo.

Planta	Variable (Factor variabilidad)	Modelo	Parámetros
Planta 1	Rendimiento TPOH	Normal	Media = (-163); Desv, Est, = 266
	Ley de alimentación	Logística	Media = 1,05; Escala = 0,05
	Recuperación	Weibull	Ubicación=0,91; Escala=0,08; Forma=3,40574
	Ley de Concentrado	Uniforme	Mínimo=0,85; Máximo=1,11
Planta 2	Rendimiento TPOH	Gamma	Ubicación=-735,9; Escala=97,27; Forma=5,83
	Ley de alimentación	Extremo máximo	Mas probable=0,97; Escala=0,07
	Recuperación	Logística	Media=0,99; Escala=0,01
	Ley de Concentrado	Normal	Media=0,98; Desv, Est, = 0,06
Planta 3	Rendimiento TPOH	Extremo mínimo	Más probable= 146,5; Escala=393,58
	Ley de alimentación	Logística	Media = 1,05; Escala = 0,05
	Recuperación	Logística	Media=0,99; Escala=0,01
	Ley de Concentrado	Weibull	Ubicación=0,58; Escala=0,42; Forma=6,467

Tabla ii. Distribuciones de probabilidad ajustada a variabilidad histórica versus plan de parámetros planta de los últimos 4 años en base mensual.

6.4 Oportunidades y mejoras

En general el modelo cuenta con una lógica que da cuenta del proceso que se desea simular y su estructura desde la secuencia y lógica del proceso, captura y ajustes de distribución de los inputs principales y outputs. Sin embargo, una oportunidad relevante es poder considerar la *variabilidad del runtime* (disponibilidad y utilización) de la planta como variable de entrada y en la concepción del modelo. Si bien hoy la considera, lo hace sobre una base determinística sin considerar la variabilidad que ha tenido este indicador sobre el resultado productivo de cada concentradora.

En un análisis de brechas reciente de los últimos 18 meses al que se tuvo acceso, entre un 20% a 30% del total del *gap* productivo se debió a la no adherencia del *runtime* planta siendo una de las fuentes principales de desviación del plan tal como se indica en la Tabla iii, por lo que al menos es recomendable considerarlo para efectos de la construcción del modelo.

Planta	% GAP por <i>runtime</i> sobre total
Planta 1	17,70%
Planta 2	23,40%
Planta 3	37,90%
Promedio	26,33%

Tabla iii. % GAP asociado a *runtime* versus gap total últimos 18 meses

En este caso, dado que las lógicas del modelo son de código abierto para efectos de esta investigación, se procedió a la obtención, depuración y ajuste de distribución a la variabilidad del *runtime* de las plantas 1,2 y 3, en fuentes oficiales de la compañía, alcanzando los resultados indicados en la Tabla iv, para posteriormente vincularlo sin inconvenientes a las lógicas del modelo.

Planta	Variable (Factor variabilidad)	Modelo	Parámetros
Planta 1	<i>Runtime</i>	logística	Media=0,95; Escala=0,05
Planta 2	<i>Runtime</i>	Weibull	Ubicación=0,55; Escala=0,44; Forma=7,0966
Planta 3	<i>Runtime</i>	logística	Media=0,99; Escala=0,03

Tabla iv. Distribuciones de probabilidad ajustada a variabilidad histórica versus plan *runtime* planta de los últimos 4 años.

Por otro lado, resulta evidente que una oportunidad de mejora teniendo en cuenta la operatividad del modelo es contar con un rol que permita mantenerlo activo y vigente de forma regular. Los procesos productivos son dinámicos y la generación de datos es aún más. Al momento de interactuar con este y otros modelos disponibles, parecería ser un rasgo común que siendo herramientas que tienen el potencial de generar valor a una red exhaustiva de *stakeholders* (desde quienes hacen y son usuarios del plan), no existan roles ni responsabilidades dedicadas a mantener bases de datos actualizadas, automatizadas y con lógicas que aseguren estar representando fielmente el proceso. En la sección posteriores de este estudio se propondrán algunas acciones que vayan en esta línea, en un contexto de avance tecnológico donde la integración entre una forma innovadora de administrar nuestros procesos no puede estar desconectado de su implementación.

7. APROXIMACIONES DE USO EN ALCANCES DE CORTO PLAZO Y PROPUESTA DE VALOR

Una vez validado el modelo desde el punto de vista lógico y de proceso, y realizados los ajustes desde la perspectiva de garantizar que la variabilidad del *runtime* fuese considerada en la versión del modelo mejorado, es relevante plantear algunas hipótesis previas que nos permitan validar el valor del uso de este tipo de herramientas.

Recapitulando sobre los capítulos iniciales de este estudio, la hipótesis es que existen dos perspectivas de potencial valor que tiene el uso de herramientas de este tipo: análisis de robustez del plan, buscando formas de medir que tan factible es el cumplimiento de este y cuáles son las principales fuentes de variabilidad que explican su resultado, y en segundo lugar proponer potenciales casos de uso práctico que tienen el potencial de guiar decisiones con valor medido.

Para explicitar este planteamiento, se desarrollarán ambas ideas de forma tal de evidenciar con mayor detalle la propuesta de valor.

1. **Herramienta soporte para la robustez del plan:** Como fue explicado con anterioridad, esta herramienta puede proveer de una forma objetiva qué tan probable es alcanzar un determinado valor fijo (o determinístico) del plan. ¿Qué valor tiene esto en sí? Por un lado, le permite al dueño del plan poder tener a través de métricas y base de análisis formal la probabilidad de cumplimiento del plan, identificar periodos con mayor incerteza en la producción de concentrado y las fuentes (*inputs*) que tienen mayor influencia sobre este resultado. Esto último de vital relevancia, teniendo en consideración que puede ser una herramienta de soporte a los equipos de mejoramiento continuo para guiar líneas de acción o planes de mejoramiento focalizados.
2. **Casos de uso práctico:** Esta es una de las principales hipótesis de este estudio, y en este sentido se plantea que además de proporcionar esta medición de robustez, este tipo de herramientas tiene el potencial de generar o guiar decisiones de valor en el corto plazo. Para esto se plantean las siguientes líneas de uso práctico, y se desarrollaron para efectos de probar su beneficio en términos de valor. En este sentido, se propondrá el uso de esta herramienta para robustecer el pronóstico de concentrado producido y calidad esperada según %Cu al equipo de comercialización de concentrado, con el objetivo de probar dos potenciales casos de uso:
 - a) Proveer rango de concentrado producido con el objetivo de optimizar los costos de *demurrage* (costo por tener naves extensión de tiempos de espera de naves en puerto).
 - b) Proveer rango de calidad (ley de %Cu en concentrado) con el objetivo de optimizar el match cliente/producto y de ese modo obtener mayor beneficio.

Estas hipótesis se basan en los siguientes supuestos que fueron discutidos con el equipo de comercialización de la compañía:

- a) Depender menos de acuerdos con contratos *spot* los que son fuertemente dependientes de las condiciones del mercado en el momento y sobre las que hay menos capacidad de negociación. Si se tiene mejor información sobre la producción, es posible utilizar acuerdos comerciales con ventas *spot* lo suficiente para manejar el “rango” pero no manejar grandes *upsides* en producción lo que podría resultar riesgoso debido a las condiciones del mercado. Manejar un rango de producción de concentrado podría ser una información muy útil para la definición de ventas de spots en horizontes trimestrales y anuales.
- b) Mejor información para contratos de plazo anual (CPA), en términos de mejor definición de plan de embarque con los clientes en volumen, pero también en términos de calidad esperada. Teniendo en cuenta esta información, la opcionalidad de terceros (parte de los CPA) se vuelve muy útil para garantizar la calidad requerida por los clientes independientemente de si el activo puede proporcionarla o no.
- c) Estar mejor preparados en términos de planificación de buques. Tener un rango de producción y calidad puede ayudar a evitar demasiados aplazamientos de un mes a otro en el último minuto por una menor producción (preparar menos o un número más realista de parcelas de concentrado para entregar en ese mes en su lugar) o retrasar el atraque para obtener mejores calidades de concentrado. Como resultado es posible tener una optimización en los costos *demurrage* (tiempo de espera), y un impacto positivo en las métricas de satisfacción del cliente.
- d) Reputación. Con la información del rango, se podrá gestionar las expectativas con los clientes y tratar de optimizar la asignación de calidad según el programa de embarque trimestral/anual.

8. SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA APLICADA A CASOS DE USO PRACTICO

Para efectos de aplicar esta aproximación estocástica, se utilizará el modelo previamente validado y con los ajustes ya planteados en el capítulo 6 de este estudio. El ejercicio por desarrollar considera ejecutar una corrida de simulación bajo los siguientes aspectos:

- a) Se simulará el plan de producción del año 2022, desde el mes M1 al M12 (12 meses), tomando en cuenta el plan de producción anual vigente en ese momento, en base mensual.
- b) En el periodo analizado, se cuenta con 10 meses de información real, lo cual permite realizar *back* análisis respectivo entre lo simulado por la herramienta y el desempeño realmente alcanzado por el proceso. Esto ayuda a comprender en las etapas posteriores que decisiones hubiesen sido factibles de haber tomado utilizando la metodología propuesta. Por otro lado, es una fuente relevante para la etapa de validación del modelo.
- c) Se utilizaron bases de datos históricas hasta el mes M-1 (es decir 1 mes antes del inicio de la corrida), en un total de 4 años de data histórica en base mensual (es decir más de 720 observaciones mensuales en total).
- d) El modelo contiene los ajustes y mejoras propuestas, en términos de incorporar la variabilidad del *runtime* de las 3 plantas.
- e) El número de corridas deben ser las suficientes para debe asegurar que el modelo alcanza límites de control de precisión con un nivel de confianza del 95%. Se configura la opción de detener cuando se alcancen los límites de precisión, que básicamente permite que la simulación se detenga cuando determinadas estadísticas alcanzan un nivel determinado de precisión. Todas las previsiones establecidas para utilizar el control de precisión deben alcanzar sus precisiones especificadas en el nivel de confianza para que la simulación se detenga. Si todas las previsiones establecidas para utilizar el control de precisión no cumplen la precisión especificada, la simulación se detiene al llegar al valor especificado en número de pruebas para ejecutar.

8.1 Resultados obtenidos

Posterior a la configuración de la corrida, se inició la simulación para el periodo indicado, entregando los siguientes resultados a nivel de volumen de concentrado producido, entregando los resultados de la tabla v. En la Ilustración vii es posible observar la curva de probabilidad y rangos se ajusta la curva a 80% certeza para el concentrado total producido en el mes M1 (desde el M2 al M12, se encuentran disponibles en los anexos de este estudio).

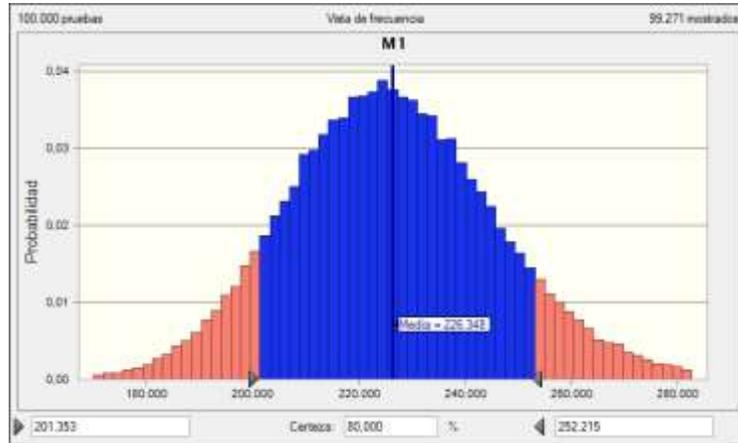


Ilustración vii: Rango de concentrado total producido para el mes M1 con 80% probabilidad (Fuente: RAC Crystal ball).

Rango Producción Concentrado (dmt) Simulado (P80)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Límite Mínimo	201.353	288.824	266.631	291.405	271.055	204.134	280.754	257.919	275.237	261.234	268.624	259.889
Media	226.348	322.505	297.676	326.667	303.996	229.302	314.817	288.639	309.975	293.483	301.372	291.253
Límite Máximo	252.215	357.422	329.860	363.398	338.303	255.591	350.347	320.544	346.077	327.186	335.514	323.906

Tabla v. Rango de producción de concentrado total de 3 plantas simulada 12 meses, con 80% probabilidad.

Es importante mencionar que el modelo permite la definición del nivel de certeza (P_{80} , P_{90} , P_{95} , etc) del rango de resultados obtenidos. Lógicamente rangos de mayor certeza son a la vez, rangos de mayor amplitud lo que puede resultar en recomendaciones que carezcan un elemento “práctico”. Este es el caso del rango de producción de concentrado analizado anteriormente dado que al correr las simulaciones con rangos de certeza de 95% (seteado por defecto), los rangos de producción de concentrado son tan amplios que pueden hacer variar en más 100,000 toneladas la recomendación de producción de concentrado esperado en un mes entre el valor mínimo y el máximo esperado, es decir, hacer variar en más de 2 veces la recomendación. Por tal motivo, se opta en este caso por ajustar el nivel de certeza de la simulación para el caso de la producción de concentrado a un P_{80} , es decir a un 80%, de modo de configurar recomendaciones que tengan un sentido lógico para efectos de programación de naves.

Otra de las variables por simular dice relación con la ley de Cu en el concentrado (%Cu) para el mismo periodo indicado. Esto con el objetivo de determinar el rango de calidad esperado y de paso, poder proporcionar información valiosa a la hora de negociar contratos de plazo anual (CPA). En este caso, los resultados simulados se expresan en la Tabla vi. A nivel de ejemplo se proporciona la curva de probabilidad y rangos con un 95% certeza para el mes M1, (véase Ilustración viii). El rango simulado a un 95% de

confianza se comporta mucho más ajustado a los rangos exhibidos en la realidad por lo que se opta por configurar bajo este nivel de certidumbre.

Ley Cu (%) en el concentrado (P95)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Límite Mínimo	23,6%	24,5%	23,0%	25,0%	23,8%	21,7%	24,9%	26,8%	26,3%	25,5%	25,2%	24,9%
Media	26,1%	26,8%	25,2%	27,4%	26,1%	23,9%	27,4%	29,3%	29,0%	28,1%	27,7%	27,3%
Límite Máximo	28,3%	28,9%	27,2%	29,6%	28,2%	25,8%	29,6%	31,6%	31,4%	30,4%	29,9%	29,4%

Tabla vi. Rango de calidad de concentrado total de 3 plantas simulada 12 meses, con 95% probabilidad.

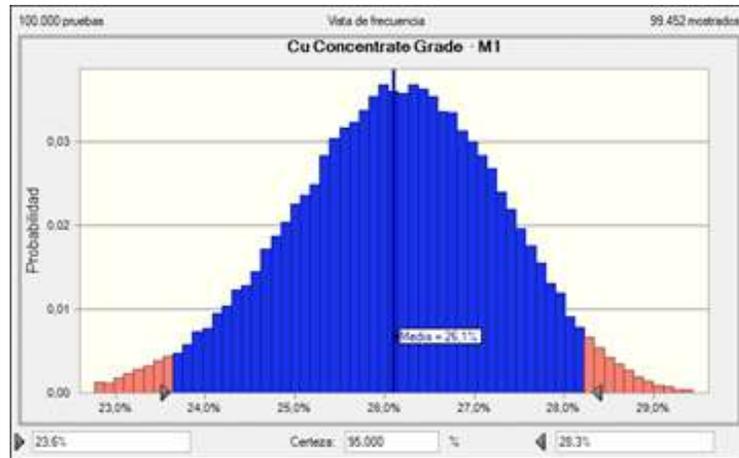


Ilustración viii: Rango de calidad esperada para el mes M1 con 95% probabilidad (Fuente: RAC Crystal ball).

8.2 Análisis y validación de resultados versus performance del sistema.

Como parte del análisis de los resultados de la corrida de simulación del plan, resulta elemental entender qué tan válidos han sido sus resultados y que grado de consistencia tienen con lo que se ha podido alcanzar del sistema durante el periodo simulado. Dicho de otro modo, y recapitulando a la metodología planteada en el capítulo 4 de este estudio, esta etapa corresponde al análisis de resultados y validación de los mismos. Para estos efectos, se plantea separar el análisis para los resultados desde el punto de vista de volumen y calidad respectivamente.

8.2.1 Análisis resultados rango de producción de concentrado

En esta etapa del análisis, el objetivo es poder corroborar como se comportó el rango de producción propuesto en comparación a los 10 meses de producción real alcanzada y las proyecciones determinísticas utilizadas en cada caso. Esto permitirá identificar si el hecho de contar con este rango pudiese eventualmente orientado mejores decisiones con el impacto en valor asociado. En la Tabla vii, se exhiben los resultados de la simulación comparado con el plan determinístico y el resultado real alcanzado.

Producción de concentrado (dmt)										
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Plan, dmt (Determinístico)	229.556	328.195	302.605	327.282	299.586	232.882	318.685	293.341	312.804	296.801
Rango, dmt (80% certainty)										
Límite mínimo	201.353	288.824	266.631	291.405	271.055	204.134	280.754	257.919	275.237	261.234
Media	226.348	322.505	297.676	326.667	303.996	229.302	314.817	288.639	309.975	293.483
Límite máximo	252.215	357.422	329.860	363.398	338.303	255.591	350.347	320.544	346.077	327.186
Real, dmt	222.942	322.896	281.597	327.209	318.279	265.602	293.063	270.167	299.722	224.684

Tabla vii. Comparación rango estocástico vs producción real alcanzada para 10 meses de producción.

De la tabla anterior, se pueden destacar los siguientes aspectos:

1. En un 80% de las veces, el rango propuesto cubre la producción realmente alcanzada por el sistema durante el periodo de 10 meses “reales”. En los meses donde no fue posible alcanzar el resultado, se ha podido corroborar que la diferencia fundamental se dio por factores como los siguientes:
 - Mes M6, evento geomecánico mayor que alteró de forma importante secuencia minera en fase de mineral con mayor aporte de leyes de Cu
 - Mes M10, evento industrial externo que interrumpió cadena logística de suministros estratégicos, alterando la producción del proceso alcanzada por la planta concentradora durante ese mes.
2. La estimación sobre la base de los valores medios simulados presenta un error porcentual absoluto medio (MAPE) menor a la metodología convencional mejorando la precisión en un **12%** (comparando con la *performance* real alcanzada). Al no considerar los 2 meses *outliers* (mes 6 y mes 10) mencionados en el punto anterior, el MAPE que tiene en la media estocástica, presenta una mejora de un **25%** respecto a la metodología convencional, tal como se indica en Tabla viii

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	MAPE	
											10 meses	8 meses
Error relativo mensual (Plan Determinístico)	3,0%	1,6%	7,5%	0,0%	5,9%	12,3%	8,7%	8,6%	4,4%	32,1%	8,4%	5,0%
Error relativo mensual (Media Estocástica)	1,5%	0,1%	5,7%	0,2%	4,5%	13,7%	7,4%	6,8%	3,4%	30,6%	7,4%	3,7%
Reducción error =											-12%	-25%

Tabla viii. Errores de pronóstico entre metodología determinística y estocástica comparado con *performance* real.

8.2.2 Análisis resultados rango de calidad de concentrado producido

En cuanto a la calidad esperada en términos de ley de concentrado (% Cu), se hace la comparativa entre el rango construido y la ley media embarcada para cada nave en el periodo de 10 meses, con el objetivo de poder determinar la validez del rango alcanzado, el cual se resumen en la Ilustración ix.



Ilustración ix: Rango de calidad esperada vs calidad real de 10 meses (Fuente: Elaboración propia)

De la curva anterior, se puede establecer que en un **80,4%** de las naves pudo ser cubierta por el rango de calidad simulado. Al igual que en el caso de la simulación de volumen de

concentrado producido, el mes M8 tiene una desviación fuera de lo habitual, y esto debido a las restricciones de extracción que se tuvieron durante este mes, en zonas de alta ley.

8.2.3 Opciones de Valor potencial capturable

Demurrage Cost Optimizacion: Uno de los principales costos que refleja la capacidad de coordinación-planificación de producción y ventas, es el *demurrage cost*, o costo por demora, que básicamente es el resultado de no cumplir con reglas acordadas en un contrato de transporte marítimo, en términos fundamentalmente de tiempos de esperas. Básicamente esto consiste en el pago de un cargo al propietario del buque fletado por falta de carga dentro de un periodo de tiempo convenido. De las razones que típicamente pueden influenciar en este costo, se tiene falta de carga (producción), demoras de puerto, demoras logísticas y esperas por calidad (marketing).

Según datos recabados de los últimos 5 años de operación, el gasto anual por *demurrage* es de 5,7 MUSD promedio anual, siendo un 36% de este impacto directo relacionado a “producción”.

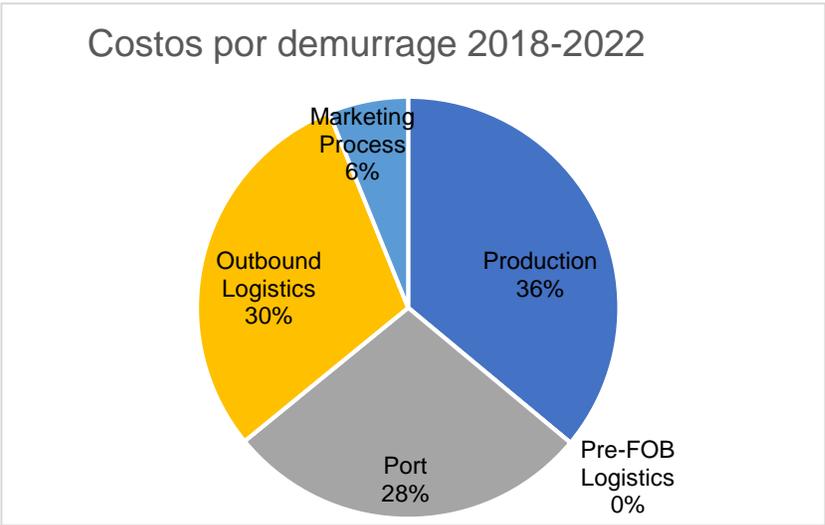


Ilustración x: Distribución del gasto por *demurrage* según causa raíz (Fuente: elaboración propia)

Se debe notar de la Ilustración x, que además un 6% adicional como resultado de demoras por requerimientos de clientes, es decir, falta de la calidad esperada.

La operación en estudio logra embarcar el concentrado de esta compañía para naves de capacidad de aproximadamente 55.000 toneladas. En base a esto, se estimaron la cantidad por naves que podrían haberse embarcado por periodo y de acuerdo al rango

estimado en la Tabla vii. Se compara esta indicación de naves por mes con el plan de embarques definido por cada periodo bajo la metodología convencional, con el objetivo de determinar potenciales desbalances entre la producción esperada y las naves realmente programadas. Es relevante considerar que el periodo de inicio de estudio, el inventario disponible en puerto (cuya capacidad está cercana a las 100.000 wmt), estuvo en torno a 2.000 wmt, por lo que se asume inventario mínimo como punto de partida, es decir, no hay necesidad de programar naves adicionales para disminuir inventario.

Número de naves a programar	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Total Recomendadas
Mínimo	4	5	5	5	5	4	5	5	5	5	47
Medio	4	6	5	6	6	4	6	5	6	5	53
Máximo	5	6	6	7	6	5	6	6	6	6	59
Recomendación (*)	4	6	5	6	6	4	6	5	6	5	53

Naves planificadas (ETA)	4	8	5	5	8	5	5	8	4	6	58
Potencial desbalance de naves	0	2	0	-1	2	1	-1	3	-2	1	5

Tabla ix. Estimación estocástica de naves por mes vs naves planificadas.

(*) Recomendación considerando media simulada del rango

Tomando en consideración los resultados de la Tabla ix, resulta de interés que las naves planificadas bajo metodología convencional se encuentran muy cercanas al rango máximo probable con un 80% certeza (58 vs 59). Si se toma en cuenta la media simulada por mes, existe el potencial de desbalance en los meses M2, M5 y M8, con un total de 5 naves extras potenciales de generar cargos por *demurrage*. Una estimación basada en lo anterior, con un promedio de 5,4 días/nave de tiempo en *demurrage* (promedio anual previo al análisis) y un costo de *demurrage* de USD 32.024/día, generaría un **potencial de ahorro USD 864.659.**

Pero, ¿cuánto fue realmente el desempeño real? En los 10 meses de análisis, la cantidad de naves programables según el desempeño real, fue de 51 naves, es decir 2 naves menos del rango medio simulado, pero 7 naves versus lo realmente programado. Esto quiere decir, que de la pérdida del costo por *demurrage* real, fue de **USD 1.137.988.** En palabras simples, hubiera sido posible optimizar hasta un **76%** del costo por este concepto.

Es importante señalar que entre las razones de *demurrage* por factor puerto (28% impacto en el *demurrage* final), están las asociadas a eventos climáticos como marejadas o vientos que no permiten el carguío seguro de las naves. En este caso, es recomendable integrar los resultados de este análisis al modelo MCC, que ya considera distribuciones de probabilidad de interrupción de puerto por factor climático.

8.2.4 Potenciales usos adicionales

- a) **Soporte a la planificación de ventas:** Un caso de uso por evaluar, es la contribución de esta herramienta en la estrategia de negociación de TCRC. Un rango más preciso de la estimación del volumen podría ayudar a definir las ventas *spots* óptimas para maximizar el valor de los contratos de largo plazo de la compañía. El valor en riesgo, basado en análisis de precios internos, tiene una línea base de \$25 MUSD por año, basado en la data del año calendario 2021, considerando un rango actualmente de entre un 20%-25% de ventas *spot*.

Por otro lado, una fracción importante de los principales contratos de venta de la compañía, han negociado TC/RC favorables bajo la premisa de cumplir con límites de calidad (en especial de leyes de Cu en el concentrado) sobre un 25% de ley. Basado en el análisis de calidad de la Sección 8.2.2, la herramienta podría ser capaz de ayudar a proporcionar una guía anual más precisa a los clientes, especialmente a aquellos más sensibles a la calidad, a fin de programar sus envíos en los meses más seguros y eventualmente reemplazar clientes menos sensibles y/o *spots* en caso contrario. Esto además de tener un beneficio potencial en términos de ingresos, también lo tiene en términos reputacionales.

- b) **Soporte planificación cadena de transporte de concentrado:** RAC no solamente podría ser una herramienta orientada a capturar valor desde una mirada de la gestión de comercialización del concentrado, sino que eventualmente podría tener aplicaciones en el ámbito de programación de mantenimiento de activos que dependen fuertemente de la producción de concentrado planta (activos aguas abajo, como concentraductos, flota de filtros, puerto, etc.). Esto básicamente porque la estrategia de mantenimiento de estos activos considera ventanas de mantenimientos que dependen de la “oportunidad” que brinda la producción aguas arriba. Actualmente, existe un incremento entre un 10-15% del costo presupuestado de contratos base, producto de lucro cesante, es decir personal que queda inmovilizado dado que no es posible ejecutar actividades en estas ventanas de mantenimiento (por mayor producción). Por otro lado, existe también la problemática de no poder visualizar estas potenciales ventanas y que abrirían la opción de ejecutar actividades por oportunidad. Es por lo anterior que mediante la utilización de este tipo de herramientas podría identificar potenciales de ventanas con mayor certidumbre para la ejecución de trabajos por oportunidad considerando los rangos de producción probables, ayudando a no sub o sobre estimar programaciones de actividades en rangos poco probables de producción. Para este potencial caso de uso, se recomienda adaptar la herramienta a casos de producción semanal, lo cual es factible dada la flexibilidad con la que cuenta actualmente la herramienta.

9. RECOMENDACIONES DE IMPLEMENTACION EN CICLOS DE PLANIFICACION Y POTENCIALES MEJORAS

La implementación de un *set* herramientas estocásticas en ciclos de planificación de corto plazo y en un proceso como la producción de concentrado, requiere no tan solo de abrir espacios de cambio cultural en la gestión del plan, sino que también debe venir acompañada de la táctica apropiada para su uso sistemático. En el caso particular de RAC y en el de cualquier otro modelo de simulación estocástica aplicada al corto plazo, resulta relevante los siguientes aspectos:

- **Definir un modelo operativo y organizacional:** Es necesario definir a nivel organizacional el modelo operativo sobre el cual se mantendrá a RAC en funcionamiento. Esto significa definir no solamente los recursos sino más relevante definir los procesos, sistemas y funciones que le brindarán soporte. En términos de proceso, se propone que este modelo sea idealmente operado por aquellas funciones que, por un lado, tengan pleno conocimiento del proceso simulado y de la planificación del mismo, y que, por otro lado, tengan acceso a la data de forma ágil y expedita.

La mantenibilidad del modelo es fundamental. Definir procesos claros de actualización de bases de datos, curvas de probabilidad y cualquier modificación de proceso que implique actualizar lógicas en el modelo, implica definir funciones y recursos que aseguren óptimo funcionamiento.

En términos de sistemas, fue posible corroborar existencia de licencias abiertas y disponibles de los complementos necesarios para correr los modelos. En este aspecto se recomienda mantener un mapeo claro de los *key users* que deben operar la herramienta, asegurar su disponibilidad considerando los modelos de soportes definidos en la organización.

Y finalmente, a nivel de funciones y personas, es clave definir los roles claves para el uso de la herramienta. La recomendación aquí es que, junto con definir los operadores claves del sistema, se definan claramente los roles que deben mantener el modelo y soportarlo ya en operación. Una de las causas identificadas en la etapa de diagnóstico del estudio fue no contar con modelos actualizados y operativos, y buena parte de eso ocurre por falta de definición de roles claves.

Finalmente, la capacitación es fundamental, tanto en términos técnicos como también desde el punto de vista conceptual. Instruir de forma adecuada a los *key users* de RAC y también comunicar a los usuarios directos e indirectos sobre el modelo, sus capacidades, que tipo de problemas puede y no puede resolver es central desde el punto de vista de la sostenibilidad del modelo y un componente relevante en la adopción de esta.

- **Herramienta indexada al ciclo de planificación:** Como fue visto a lo largo del estudio, esta herramienta opera en complemento al plan y, por ende, la recomendación es que sea parte de su ciclo en términos de proceso, programación y calendarización. En este aspecto, se recomienda incluir corridas de simulación con la herramienta post etapa de construcción del plan de concentrado, con el objetivo de proveer rangos de volumen y calidad en

coherencia a los resultados del plan y que estos entregables se encuentren adecuadamente mapeados en los ciclos de trabajo.

- **Monitorear el desempeño:** Una rutina elemental para mantener un modelo que garantice resultados de buena calidad, tiene que ver con el monitoreo de su desempeño. En este aspecto se recomienda establecer al menos una rutina mensual formal que permita corroborar entre otras cosas: validez de las previsiones vs desempeño del sistema, agilidad en las corridas de simulación, estado de la actualización de bases de datos y curvas de probabilidad.
- **Implementar ciclo de mejora continua:** Mas allá del desempeño operativo del modelo RAC, se recomienda habilitar rutinas que permitan identificar opciones de mejora de sus capacidades, así como activar la posibilidad de integración con otros modelos en la lógica de robustecer sus resultados. Por ejemplo, se vió a lo largo del estudio que uno de los elementos que puede fácilmente gatillar cambios significativos en sus resultados, tomando como referencia los 10 meses de prueba, dice relación con la adherencia a la secuencia minera de extracción. Y si bien RAC logra capturar la variabilidad de cumplimiento de leyes de alimentación, concentrado y calidad de minerales en base al performance histórico, dada la disposición de minerales actuales de la compañía y su dependencia de fases y zonas puntuales de mineralización, es válido integrar simulaciones desde el punto de vista minero con foco en esta fase de explotación. Hay disponibles una serie de desarrollos tanto interna como externamente que pueden proveer este tipo de *outcomes* y que por tanto son factibles de integrar a RAC. Finalmente, habilitar nuevas formas o metodología que permitan robustecer la simulación y predictibilidad del modelo a partir de análisis avanzado de datos, puede ser un paso siguiente de este tipo de herramientas necesario de explorar. De acuerdo a lo planteado recientemente por Both y Dimitratokopulos (2022), es también recomendable explorar el uso de aproximaciones estocásticas en el campo de mejorar la precisión de los modelos de rendimientos del molino, dado el avance que se han tenido en el uso de modelos de este tipo como complemento a los modelos geometalúrgicos.
- **Plan Comunicacional:** Un elemento fundamental para habilitar el cambio cultural y por ende el uso de este tipo de herramientas, radica en comunicar de forma consistente sus resultados. El estudio evidenció que sobre todo desde el punto de vista táctico, no existe mucha claridad sobre el potencial uso de este tipo de herramientas y tampoco el valor que es posible capturar usándolas. Las rutinas de monitoreo de desempeño y mejoramiento mencionadas antes, son vitales no solamente para identificar oportunidades y gestionar las brechas, sino que también para comunicar de forma efectiva y transversalmente sus resultados.
- **Gestión de cambio:** Para todo cambio conceptual y/o habilitación de nuevas herramientas para la toma de decisiones que surjan a partir del uso de RAC, tal como se propone en este estudio, es recomendable iniciar un proceso de gestión de cambio, que sea capaz de identificar todos los procesos internos o externos que puedan verse afectados por la implementación o potenciales riesgos y con ello, administrar de forma exitosa la transición. Esto es parte de un proceso

mandatorio internamente en la compañía analizada y recomendable también en este caso.

10. CONCLUSIÓN

La industria minera ha estado experimentando un cambio exhaustivo en los avances tecnológicos durante los últimos años, desde la operación de centros remotos, intensificación de autonomía de equipos móviles y plantas fijas hasta la implementación de herramientas analítica avanzada para la optimización de procesos. Esta oportunidad de avance tecnológico debe avanzar de la misma forma en áreas de programación y planificación, especialmente en el campo del corto plazo, donde tomando como base la compañía minera analizada, hay un amplio aún campo por desarrollar.

En la industria es conocido el uso y/o investigaciones sobre aproximación estocástica desde una mirada de la optimización del minado como base para la toma de decisiones estratégicas de largo plazo o en la evaluación de minado óptimo para la definición de la táctica de extracción en el corto plazo y los recursos necesarios para ello desde una mirada “minera” Hustrulid *et al.* (2013). Sin embargo, esta tesis propone un campo de aplicación en la toma de decisiones tácticas de corto plazo y en particular en la producción de concentrado de cobre. Bajo esa perspectiva y a partir del estudio desarrollado se capturan las siguientes conclusiones:

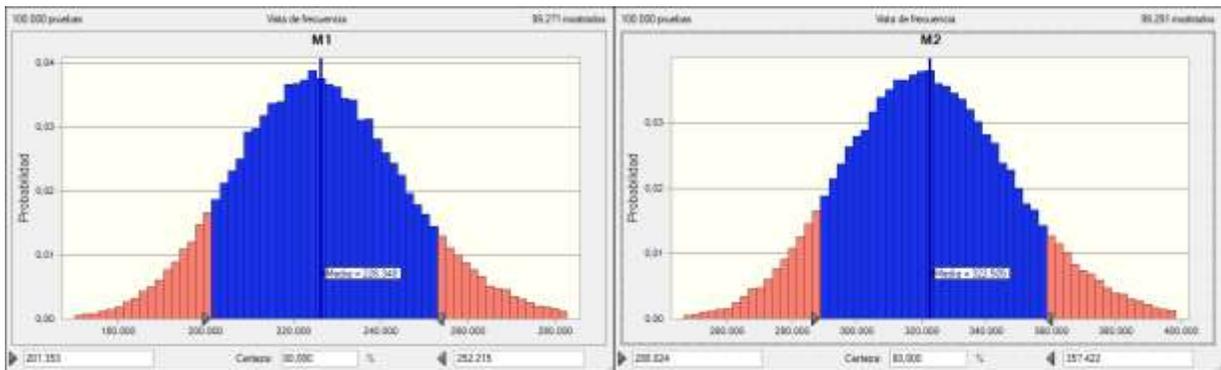
1. A partir de la propuesta de aplicación planteada en esta tesis, existió un potencial de captura de valor entorno a kUS\$ 800 utilizando el modelo RCA versus la forma convencional de planificación de concentrado, cuya base está en la posibilidad de optimización de costos de *demurrage*, mejor locación de calidades de concentrado y optimización de ventas spots, tomando como base el año 2021-2022, esto sin contar con el valor “reputacional” de entregar el producto esperado por clientes tipo LTC. Esto refuerza la idea que los ciclos de planificación de corto plazo tienen, desde la planificación de corto plazo, oportunidades de optimizar sus procesos y de proveer entregables como complemento a la perspectiva determinística o convencional.
2. Identificar casos de uso o aplicación con valor demostrable es crucial. Esto es esencialmente identificar el propósito, alcances, objetivos y métricas de éxito. Los modelos de simulación ofrecen una gama amplia de aplicación, pero no son la solución a todos los problemas, por lo que una clara identificación del problema es fundamental.
3. Es recomendable montar un modelo operativo-organizacional entorno a este tipo de herramientas y su desempeño en respuesta al cambio cultural requerido. No habiendo una visión sistémica y de proceso junto al uso mismo del modelo, e integrada a los ciclos de planificación de corto plazo, inexorablemente reunirá condiciones para un uso inadecuado o simplemente su desuso. En este sentido una buena gestión de cambio y plan comunicacional son de gran importancia. Hoy las compañías han implementado modelos de gestión del desempeño, con rutinas que sin duda favorecerán condiciones para la sustentabilidad de este tipo de herramientas.

4. El uso de técnicas avanzadas en el análisis de datos y la proliferación cada vez mayor de la disponibilidad de la data, puede abrir un campo aún mayor para mejorar la predictibilidad de este tipo de modelos. En este caso, es recomendable hacer las sinergias respectivas con los equipos de Advanced Analytics de la compañía en estudio, buscando espacios para potenciar y/o mejorar el uso de este tipo de herramientas.

11. BIBLIOGRAFIA

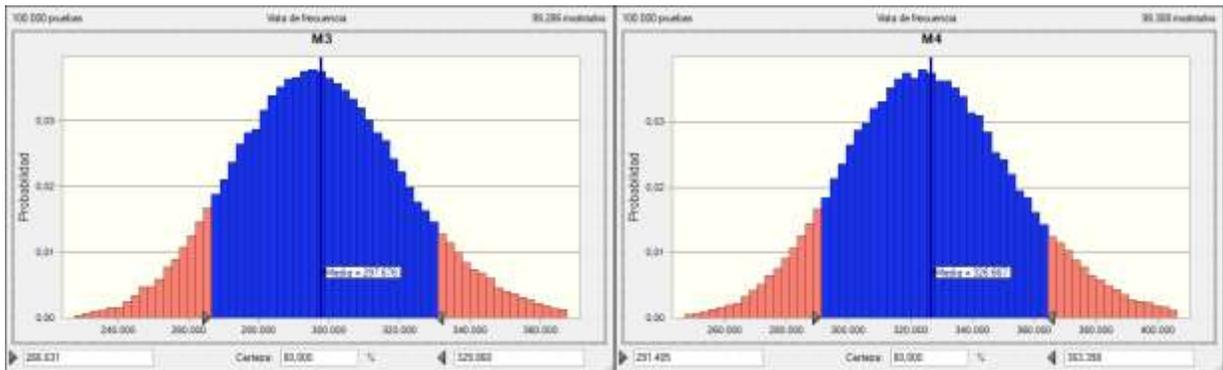
- Blom M. & Pearce A.R. (2019), Stuckey PJ. "Short-term planning for open pit mines: A review". *Int J Min Reclam Environ*; 33(5):318–39.
- Both C. & Dimitrakopoulos R. (2020). "Joint stochastic short-term production scheduling and fleet management optimization for mining complexes". *Optim Eng*;21 (4):pp 17–37.
- Both C. & Dimitrakopoulos R. (2022). "Integrating geometallurgical ball mill throughput predictions into short-term stochastic production scheduling in mining complexes".
- Dimitrakopoulos, R. (2011). "Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments". *J Min Sci* 47, pp 138–150
- Guzmán, J.I. (2019). "Fundamentos de Economía Minera", pp 379-461, Editorial Reverté S.A.
- Hustrulid W.A., Kuchta M., Martin R.K. (2013). "Open Pit Mine Planning and Design". London, UK: Taylor & Francis.
- Koutsoyiannis, D. (2005). "Stochastic Simulation of Hydrosystems (SW-913)".
- Quigley M. & Dimitrakopoulos R. (2020). "Incorporating geological and equipment performance uncertainty while optimising short-term mine production schedules". *Int J Min Reclam Environ*; 34(5):362–83.
- Siebert Sandoval, M. I. (2015). "Metodología para la comparación entre planes mineros estocásticos y determinísticos", pp 24-27.

12. ANEXOS



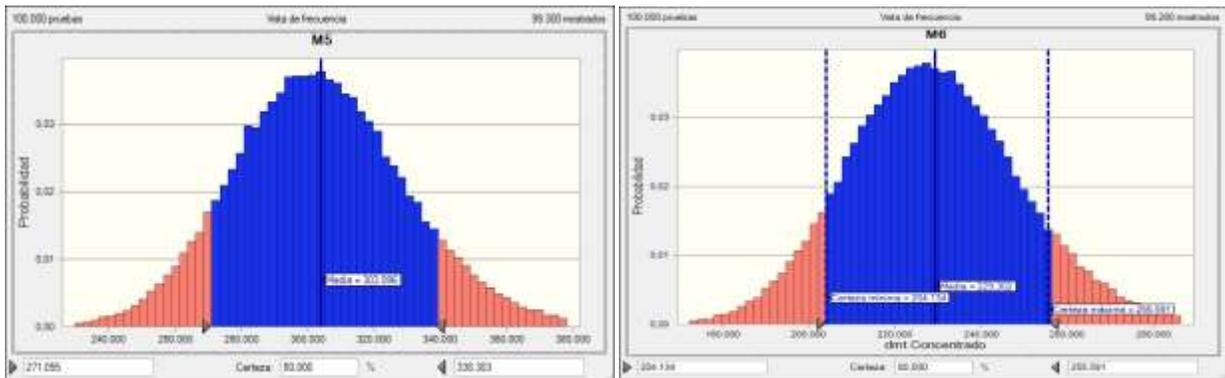
Anexo A Rango de producción concentrado mes M1

Anexo B Rango de producción concentrado mes M2



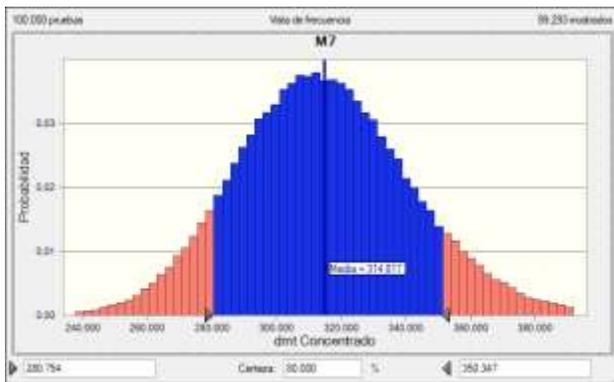
Anexo C Rango de producción concentrado mes M3

Anexo D Rango de producción concentrado mes M4

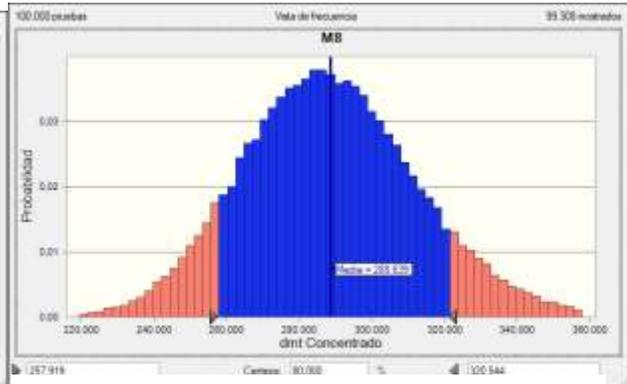


Anexo E Rango de producción concentrado mes M5

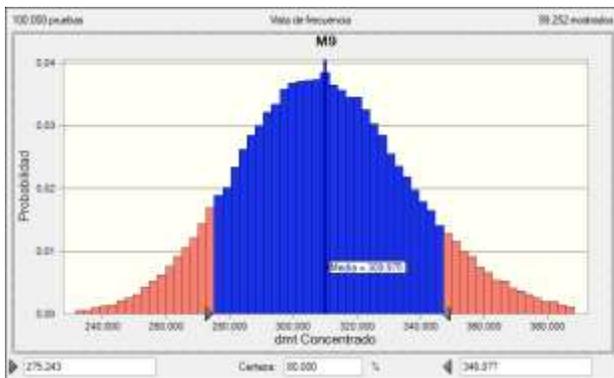
Anexo F Rango de producción concentrado mes M6



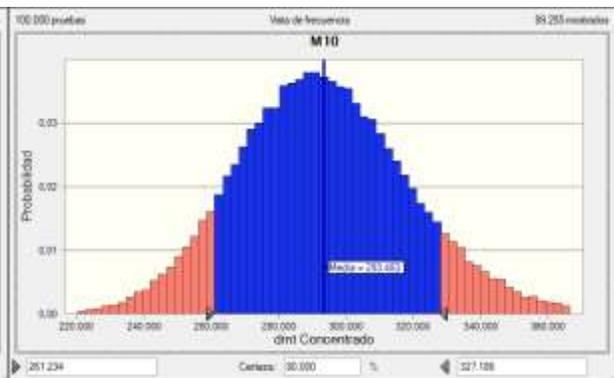
Anexo G Rango de producción concentrado mes M7



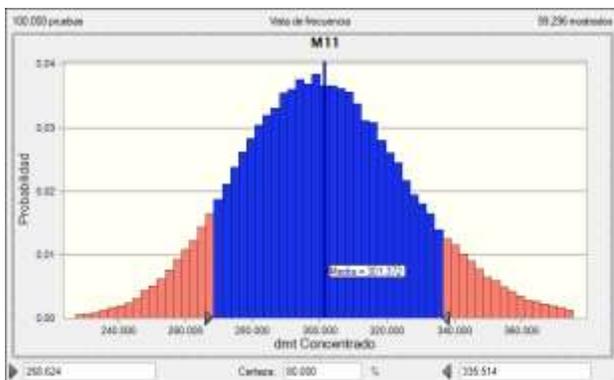
Anexo H Rango de producción concentrado mes M8



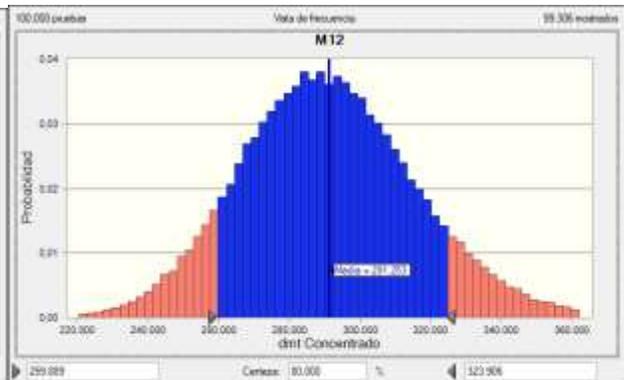
Anexo I Rango de producción concentrado mes M9



Anexo J Rango de producción concentrado mes M10



Anexo K Rango de producción concentrado mes M11



Anexo L Rango de producción concentrado mes M12

Incorporación herramientas estocásticas en planificación minera de corto plazo

Nos encantaría conocer tu opinión sobre el uso de este tipo de herramientas en los ciclos de planificación

[Acceder a Google](#) para guardar el progreso. [Más información](#)

* Indica que la pregunta es obligatoria

¿Por qué considera que el uso de este tipo de herramientas es menor en ciclos de planificación de corto plazo?

- Falta de tiempo y/o recursos
- Herramientas no disponibles
- Herramientas poco conocidas
- No existe metodología implementada
- Otros:

Comentarios *

Tu respuesta

Sugerencias de mejora:

Tu respuesta

Rol (Planner/Superintendente/Gerente/Otro)

Tu respuesta

Tu respuesta

Enviar

Borrar formulario

Anexo M Cuestionario de diagnóstico uso de herramientas estocásticas.