UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

VALPARAÍSO-CHILE

EVALUACIÓN Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA FORMAT AL CASO DE ESTUDIO DE LA INDUSTRIA CUPRÍFERA EN CHILE

JAVIERA CATALINA BARRAZA URRA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO/A CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA:

CHRISTOPHER NIKULIN

PROFESOR CORREFERENTE:

MÓNICA LÓPEZ

AGOSTO 2017

1. Agradecimientos

Primero que todo agradezco a mi familia, por creer en mí y entregarme todas las herramientas para poder llegar hasta este punto. Infinitas gracias por el amor, el apoyo, la comprensión y contención.

A mis amigos y compañeros de universidad, que con su granito de arena aportaron tanto en mi desarrollo profesional como personal.

A mi profesor guía, quien logró que esta última etapa de mi estadía en la universidad sea amena, permitiéndome conocer su gran equipo de trabajo. Gracias por siempre brindarme ayuda cuando lo necesité.

Todo esfuerzo tiene su recompensa.

2. Resumen ejecutivo

La metodología FORMAT tiene un enfoque de predicción tecnológica capaz de satisfacer la necesidad de las industrias manufactureras apoyando los procesos de toma de decisiones en la planificación de estrategias corporativas de I+D. La metodología fue desarrollada dentro del consorcio FORMAT, reuniendo a socios tanto de la industria como académicos de Marie-Curie Actions financiado por 7th Framework Programme - IAPP PEOPLE.

Hasta el momento de la formulación de este informe, los casos de estudio a los que se les ha aplicado la metodología han sido de autoría de miembros del mismo consorcio; no existen aplicaciones desarrolladas por gente externa al proyecto FORMAT, es por esta razón que se decidió aplicar esta metodología para el caso de la minería cuprífera en Chile con el fin de evaluar qué tan efectiva es la herramienta FORMAT, tanto en el ámbito académico como industrial.

En el presente documento se desarrollará la aplicación de la metodología con un caso de estudio en la industria cuprífera en Chile. Se responderá cada una de las etapas y sub-etapas exigidas por la metodología, de las cuales se generarán entregables que permitirán justificar la decisión final. A su vez, a medida que se realizan las respuestas, se evaluará la fluidez con la que se logra argumentar cada etapa, para finalmente en las conclusiones, determinar los pros y los contras de la metodología FORMAT.

3. Abstract

The methodology FORMAT has an approach for technological forecasting capable of satisfying the need of the manufacturing industries supporting the decision-making processes in planning corporate strategies for R&D. The methodology has been developed within the FORMAT consortium, gathering partners from both industry and academia in a Marie-Curie EU funded project of the 7th Framework Programme - IAPP PEOPLE.

So far to writing this report, the case studies to which the methodology has been applied have been made by members of the same consortium; there are no applications developed by people external to the FORMAT project, it is for this reason that it was decided to apply this methodology to the case of copper mining in Chile in order to evaluate how effective the FORMAT tool is, both in the academic and industrial fields.

In this paper, the methodology applied to the case study of the copper industry in Chile will be developed. Each of the stages and sub-stages required by the methodology will be answered, from which will be generated out puts that will justify the final decision. At the same time, as the answers are made, the fluidity with which each stage will be argued will be evaluated, to finally in the conclusions, determine the pros and cons of the FORMAT methodology.

4. Glosario

FORMAT : Forecast and Roadmapping for Manufacturing Technologies (Pronóstico y Planificación para Tecnologías de Fabricación).

IAPP : Industry-Academia Partnerships and Pathways (Alianzas entre la industria y la academia).

STF : System To be Forecasted (Sistema a ser pronosticado).

I+D : Investigación y desarrollo.

DM : decision makers (tomadores de decisiones).

TF : Technological Forecasting (Pronóstico Tecnológico)

TRIZ : Teoría para Resolver Problemas de Inventiva

5. Índice de contenido

1. Agradecimientos III
2. Resumen ejecutivo IV
3. Abstract V
4. Glosario VI
5. Índice de contenido VII
6. Índice de figuras IX
7. Índice de tablas XI
8. Introducción 1
9. Objetivos 2
   9.1. Objetivo general 2
   9.2. Objetivos específicos 2
10. Estado del arte 3
11. Metodología 6
12. Caso de estudio y aplicación 9
   12.1. FOR 9
      12.1.1. FOR_1: Formular objetivos 9
      12.1.2. FOR_2: Definir los entregables esperado 10
      12.1.3. FOR_3: ¿Pronosticar o no pronosticar? 11
      12.1.4. FOR_4: Formular preguntas 13
      12.1.5 FOR_5: Planificación del proyecto 13
      12.1.6 Compuerta FOR 14
   12.2 M 16
      12.2.1 M_1: Definir el sistema a pronosticar 16
      12.2.2 M_2: Identificar alternativas 19
      12.2.3 M_3: Medición de rendimiento 23
      12.2.4 M_4: Seleccionar alternativa 26
      12.2.5 M_5: Contexto del estudio 27
      12.2.6 Compuerta M 35
   12.3 A 36
      12.3.1 A_1: Identificar recursos limitantes 36
      12.3.2 A_2: Reconocer los patrones de evolución 38
      12.3.3 A_3: Ajustar series de tiempo 43

12.3.4 A_4: Definir rasgos futuros 54
12.3.5 Compuerta A 56
12.4 T 57
12.4.1 T_1: Responder preguntas 57
12.4.2 T_2: Resultados del informe 58
12.4.3 T_3: Desarrollar informes 59
12.4.4 T_4: Entregar presentación 59
12.4.5 Compuerta T 59
14. Conclusiones 60
15. Bibliografía 63
16. Anexos 66

6. Índice de figuras

Figura 1: Porcentaje de aparición acumulativa de artículos por año. 4
Figura 2: Modelo de Proceso de Etapa-Compuerta para la Metodología de Pronóstico Tecnológico (FORMAT). 6
Figura 3: Diagrama de la etapa FOR y sus sub-etapas. 9
Figura 4: Procesos para la extracción de mineral. 11
Figura 5: Diagrama de la etapa M y sus sub-etapas 16
Figura 6: Proceso general de minería para la industria del cobre. 19
Figura 7: Configuración general de una máquina de clasificación y sus subprocesos. 20
Figura 8: Tipos de máquina clasificadora (imagen de la izquierda: sistema de correa transportadora con separación neumática, imagen de la derecha: Sistema de chute con separación neumática). 21
Figura 9: Descomposición funcional del proceso minero. 28
Figura 10: Diseño conceptual de un sistema de separación de minerales. 29
Figura 11: Diagrama de la etapa A y sus sub-etapas. 36
Figura 12: Diagrama IDEF0 del proceso de selección y separación de una roca. 37
Figura 13: Gráfica de regresión para el precio del cobre refinado [US$/lb]. 44
Figura 14: Gráfica de residuos estandarizados para la regresión cuadrática del precio del cobre refinado. 45
Figura 15: Gráfica de regresión para el costo en la minería del cobre en Chile [cUS$/lb]... 46
Figura 16 : Gráfica de residuos estandarizados para la regresión lineal del costo en la minería del cobre en Chile. 47
Figura 17: Gráfica de regresión para el consumo de energía eléctrica en [GWh] en la minería de cobre. 49
Figura 18: Gráfica de residuos estandarizados para la regresión lineal del consumo de energía eléctrica. 50
Figura 19: Gráfica de regresión para la ley de mineral de cobre en Chile [%]. 51
Figura 20: Gráfica de residuos estandarizados para la regresión lineal del porcentaje de ley de mineral de cobre en Chile. 52
Figura 21: Diagrama de la etapa T y sus sub-etapas. 57
Figura 22: Diapositiva 1 66
Figura 23: Diapositiva 2 66
Figura 24: Diapositiva 3 67
Figura 25 Diapositiva 4 67
Figura 26: Diapositiva 5 68
Figura 27: Diapositiva 6 68
Figura 28: Diapositiva 7 69
Figura 29: Diapositiva 8 69
Figura 30: Diapositiva 9 70
Figura 31: Diapositiva 10 70
Figura 32: Diapositiva 11 71
Figura 33: Diapositiva 12 71
Figura 34: Diapositiva 13 72
Figura 35: Diapositiva 14 72

Figura 36: Diapositiva 15 73
Figura 37: Diapositiva 16 73
Figura 38: Diapositiva 17 74
Figura 39: Diapositiva 18 74
Figura 40: Diapositiva 19 75
Figura 41: Diapositiva 20 75
Figura 42: Diapositiva 21 76
Figura 43: Diapositiva 22 76
Figura 44: Diapositiva 23 77
Figura 45: Diapositiva 24 77
Figura 46: Diapositiva 25 78
Figura 47: Diapositiva 26 78
Figura 48: Diapositiva 27 79
Figura 49: Diapositiva 28 79

7. Índice de tablas

Tabla 1: Número de metodologías extraídas por diferentes autores en el campo de previsión. 3
Tabla 2: Breve descripción de las etapas de la metodología FORMAT. 7
Tabla 3: Número de sesiones y duración de las etapas en la metodología FORMAT. 14
Tabla 4: Carta gantt del proyecto. 14
Tabla 5: Descripción general de las tecnologías de clasificación usadas en diferentes industrias mineras. 22
Tabla 6: criterios de comparación. 24
Tabla 7: Clasificación de tecnologías y comparación con la minería y los procesos de clasificación relacionados. 26
Tabla 8: Definición de módulos funcionales y sus posibles componentes para el sistema de separación de minerales. 29
Tabla 9: pantalla múltiple 34
Tabla 10: Problemas críticos del STF. 38
Tabla 11: Análisis de patentes sobre tecnologías de separación de minerales, específicamente del cobre. 42
Tabla 12: Análisis de coeficientes para regresión cuadrática del precio del cobre refinado. 44
Tabla 13: Pronósticos para el precio del cobre refinado [US$/lb]. 45
Tabla 14: Análisis de coeficientes para la regresión lineal del costo en la minería del cobre en Chile. 47
Tabla 15: Pronósticos para el costo de la minería del cobre en Chile. 48
Tabla 16: Análisis de coeficientes para la regresión lineal del consumo de energía eléctrica. 49
Tabla 17: Pronósticos para el consumo de energía eléctrica. 50
Tabla 18: Análisis de coeficientes para regresión lineal de la ley de mineral de cobre en Chile. 52
Tabla 19: Pronósticos para el porcentaje de ley de mineral de cobre en Chile. 53

8. Introducción

Para que Chile siga obteniendo un crecimiento económico la moderna teoría del crecimiento enfatiza el rol que tiene la acumulación de conocimiento como determinante del crecimiento económico. Los diferentes niveles de ingresos observados entre los países estarían asociados, más que a la acumulación de factores productivos (como capital y mano de obra), a la productividad de los mismos (José Miguel Benavente H., 2006), aspectos relacionados ineludiblemente al progreso tecnológico. La reciente evidencia empírica confirma que uno de los principales determinantes del crecimiento económico es la innovación tecnológica.

Es a raíz de esto último que nace desarrollar el presente informe, con la finalidad de fomentar el concepto de innovación relacionado a la tecnología y más específicamente en la industria minera. Esto se pretende lograr a través de la metodología FORMAT, una herramienta de apoyo a los tomadores de decisiones (DM) cuando se trata de inversiones, dirigir las visiones de investigación y llevar a cabo estrategias de innovación.

¿Por qué el caso de la industria cuprífera en Chile?

Chile se ha beneficiado enormemente gracias a la contribución del cobre. El cobre ha jugado un papel clave e insustituible en el desarrollo alcanzado por Chile. La industria del cobre es la que mayores ingresos aporta al Fisco gracias a las altas cifras de mineral exportado. Permitió que las reservas internacionales aumentaran significativamente y que hoy cuente con considerables excedentes para enfrentar el futuro. Además, el cobre posibilitó que Chile hoy sea un país menos endeudado y que sus ciudadanos paguen menos impuestos y tengan mayores ingresos (Patricio Meller, 2013).

La extracción de cobre ha sido significativa tanto a nivel nacional como a nivel internacional, la participación chilena en el total de la producción mundial fue cercana al 15% durante los primeros 80 años (1900-80); hacia finales del Siglo XX la participación mundial del cobre chileno aumentó a un 35%. Hoy en día la producción nacional corresponde a un tercio de la producción mundial lo que convierte a Chile en el principal productor de cobre en el mundo (Patricio Meller, 2003).

El problema es que en pleno siglo XXI existen desafíos que debe enfrentar la industria para poder mantenerse como líder mundial; entre los desafíos se encuentran: el estancamiento de la producción de cobre, calidad del recurso en proceso de progresivo deterioro, altos costos de producción, tarifas eléctricas de las más altas entre los países mineros, el agua como recurso escaso y caro, finalmente la brecha entre productividad laboral y alza en costos de mano de obra (Consejo Minero, 2012).

Es en este momento que se requiere utilizar la herramienta FORMAT, ya que ésta otorgará apoyo a los encargados de la toma de decisión y ayudará a gestionar la complejidad multidisciplinaria de los sistemas actuales además de anticipar las características futuras de los productos y procesos (Gaetano Cascini, 2012) y así poder enfrentar dichos desafíos de la manera más eficiente, confiable y rentable posible.

9. Objetivos

9.1. Objetivo general

Evaluar la metodología de prospectiva tecnológica, conocida como FORMAT, verificando su facilidad de uso para personas sin experiencia previa en TRIZ.

9.2. Objetivos específicos

Para evaluar la metodología FORMAT, se realizará un caso de estudio aplicado a la industria cuprífera en Chile, el cual tendrá como objetivos:

- Aplicar sistemáticamente cada una de las etapas propuestas por formas tales como FOR, M, A, T,
- Generar un caso de estudio en la industria cuprífera que permita validar la metodología paso a paso.
- Validar la factibilidad de uso de la metodología FORMAT para personas sin previa experiencia en herramientas sistemática como es el caso de TRIZ.

10. Estado del arte

En la actualidad existe un gran número de metodologías acerca de técnicas de modelado para describir productos y procesos, cada una con características complementarias, fortalezas y debilidades. Con el objetivo de resumir los conocimientos en el campo de la TF (Technology Forecasting), el Consorcio FORMAT desarrolló una revisión de la literatura mediante técnicas de indexación y clasificaciones de metodologías de TF.

El documento (Niccolò Becattini, 2013) recoge 29 de las técnicas de modelado más difundidas para representar productos y procesos. Las técnicas de modelado se presentan en tres categorías principales: una recoge las técnicas dirigidas principalmente a modelar productos; la segunda, a su vez, agrupa todos los métodos que se dirigen al modelado de procesos; por último, la tercera categoría incluye las técnicas capaces de capturar y representar aspectos relativos tanto a productos como a procesos. La Tabla 1 ilustra las técnicas y categorías contabilizadas.

#	Nombre de la fuente	Método	Categorías
1	A.L. Porter et al. " Análisis de futuros tecnológicos: Hacia la integración del campo y nuevos métodos" 2004	51	9
2	Makridakis et al. "Métodos y aplicaciones de pronóstico" 1998	19	19
3	J.Scott Armstrong et al. "Principios de previsión " 2002	10	10
4	Vanston, "Futuros tecnológicos", 2005	28	11
5	FOR-LEARN	26	9
6	J.P. Martino " Pronóstico tecnológico para la toma de decisiones", 1993	39	11
7	Metodología de Investigación de futuros. Versión 2.0, Proyecto Milenio, 2002	27	-
8	Metodología de Investigación de futuros. Versión 3.0, Proyecto Milenio, 2011	35	-
9	Pronóstico Tecnológico y Cambio Social. Problemas especiales desde 2004	9	-
10	Revista Internacional de Pronósticos, Temas y secciones especiales desde 2000	4	-
11	Competición M3	24	6
12	A.L. Porter – presentación, 2005.	19	13

Tabla 1: Número de metodologías extraídas por diferentes autores en el campo de previsión.
Fuente: (Christopher Nikulin et al., 2011)

La categorización creada por (Dmitry Kucharavy et al., 2005) aparenta ser la más cómoda para agrupar todas las técnicas en un número manejable de clases: modelos causales (por ejemplo, analogía, análisis morfológico, leyes y patrones de evolución del sistema); modelos fenomenológicos (por ejemplo, extrapolaciones de datos de series de tiempo, regresiones); modelos intuitivos (por ejemplo, encuestas de Delphi, entrevistas estructuradas y no estructuradas); monitoreo y mapeo (por ejemplo, exploración de literatura y fuentes publicadas, escenarios, mapeo de información existente).

Un análisis histórico permitió comprender el marco teórico completo de las técnicas y su evolución. Con más detalle, al contar las publicaciones en dos de las bases de datos científicas más reconocidas (Scopus y Google Scholar), les fue posible a los académicos analizar las tendencias de desarrollo y aplicación de las metodologías de TF. Dentro de una tendencia globalmente creciente de publicaciones en el campo, la Figura 1 presenta la cantidad relativa de publicaciones, lo que demuestra el cambio de interés en las categorías a lo largo del tiempo. En términos generales, los modelos causales y el monitoreo y mapeo revelaron una participación creciente entre las técnicas de TF. Los autores adoptaron el resultado de este análisis como punto de partida para construir la metodología FORMAT.

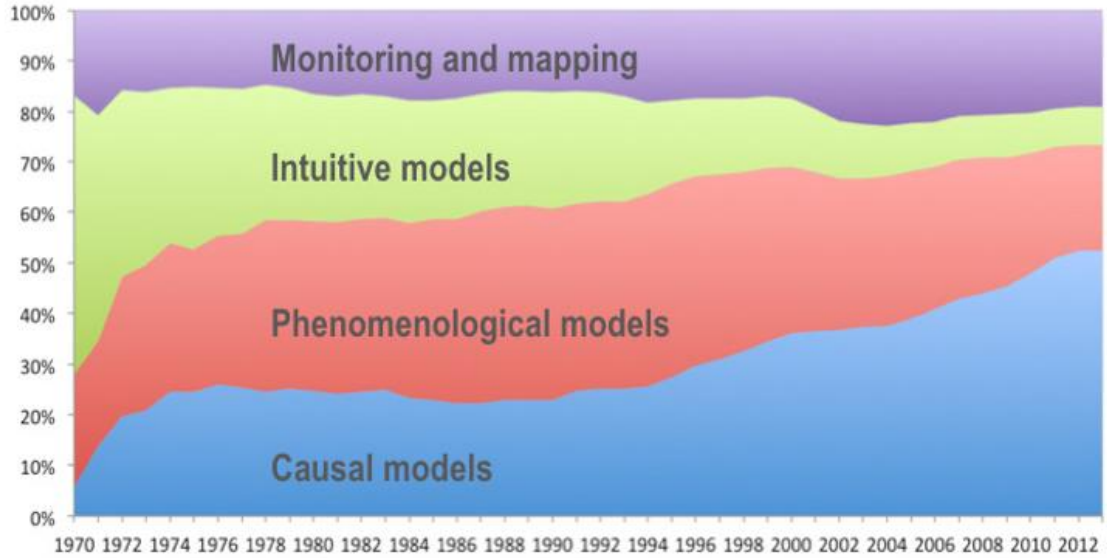


Figura 1: Porcentaje de aparición acumulativa de artículos por año.
Fuente: (Christopher Nikulin et al., 2011)

Dado el ámbito de actividad del socio industrial del consorcio FORMAT y el gran número de técnicas que ya existen, los puntos cruciales a considerar al desarrollar una metodología de pronóstico innovadora están relacionados con:

- Satisfacción de los requerimientos metodológicos de los socios industriales, considerando la evolución de los productos, la tecnología y la organización.

- Flexibilidad de las técnicas utilizadas para alcanzar los objetivos de predicción, mediante la creación o combinación de técnicas que ya existen.

- Repetibilidad y adaptabilidad de la metodología, con el fin de impulsar sistemáticamente el proceso de pronóstico para los desarrolladores (por ejemplo, tratar de evitar un asesor experto en metodología). Además, tiene que ser fácil de usar en diferentes niveles organizacionales.

- Robustez y fiabilidad de la metodología, adoptando cuatro elementos principales que se consideran esenciales para predecir correctamente una tecnología (Martino, J.P., Technological Forecasting for Decision Making): i) la tecnología que se está pronosticando; ii); la declaración de las características de la tecnología; Iii) el tiempo de pronóstico; iv) la declaración de la probabilidad asociada con el pronóstico. Para ello, se ha creado la metodología FORMAT para apoyar a los responsables de la toma de decisiones en la industria manufacturera.

11. Metodología

La metodología FORMAT ha sido concebida como un proceso Etapa-Compuerta (Figura 2) con el fin de explotar sus capacidades intrínsecas para mantener el control sobre los proyectos basados en escalones, sin importar su fuerza fuera de alcance y debilidades en el apoyo al proceso de innovación que implica el desarrollo de ideas (Robert G. Cooper, 2008).

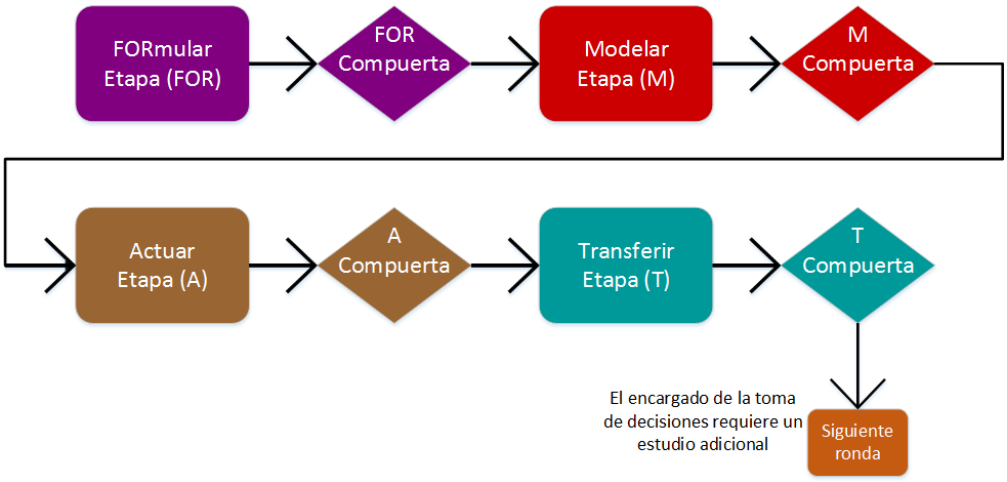


Figura 2: Modelo de Proceso de Etapa-Compuerta para la Metodología de Pronóstico Tecnológico (FORMAT).

Cada etapa se describe mediante dos elementos, para dar una estructura interna similar entre ellas. El primer ítem es una descripción del objetivo de la etapa, utilizando una sintaxis funcional: permite a los analistas tener una descripción clara del objetivo a alcanzar. Los analistas tienen que abordar la descripción funcional para pasar a la siguiente etapa. El segundo ítem es una lista de verificación más detallada de las interrogantes que deben abordarse, a fin de cumplir con la función principal de dicha etapa. Luego, cada etapa es seguida por una compuerta, que muestra los requisitos detallados (en términos de necesidades de información) que prescriben lo que debe comprobarse antes de decidir si continúan con las siguientes actividades del proyecto TF.

En la Tabla 2 se describen las principales funciones, preguntas y requisitos para cada pareja etapa-compuerta. Cuatro etapas constituyen el proceso TF: las etapas se dividen según el acrónimo FORMAT: FORmular, Modelar, Actuar y Transferir.

En primer lugar, la etapa FOR está relacionada con la motivación del análisis del pronóstico. Esta etapa tiene que comprobar si el pronóstico es realmente necesario o no. Además, en esta etapa los analistas deben ponerse de acuerdo sobre: i) la descripción de los principales objetivos y los resultados previstos del proyecto de pronóstico; ii) una declaración clara sobre cómo se aplicará el pronóstico dentro del proceso de toma de decisiones; iii) la posibilidad de satisfacer las necesidades formuladas con o sin TF. Además, los recursos para

abordar el proyecto de pronóstico tienen que ser definidos y las actividades adecuadamente planificadas.

Etapa	Principales funciones	Preguntas
FOR: Diagnosticar preguntas y planificar el proyecto	<preparar & hacer>	¿POR QUÉ necesitamos saber acerca del futuro?
	<decisión> <acerca del proyecto a pronosticar>	¿QUÉ necesitamos saber acerca del futuro?
	<definir><límites / recursos> <del proyecto a pronosticar>	¿CÓMO planeamos aprender sobre el futuro?
M: Definir el sistema para los contextos de pronóstico y estudio	<revisión> <conocimiento existente> <acerca del sistema>	¿Para QUÉ sirve el sistema a pronosticar (STF)? (¿POR QUÉ necesitamos el STF?)
		¿QUÉ sistemas permiten obtener los mismos resultados?
		¿CÓMO medir el rendimiento y los gastos del STF y sus alternativas?
		¿CUÁL es, fueron y se espera que sean el STF y sus alternativas principales?
A: Desarrollar pronóstico para el sistema y el contexto definidos	<identificar> <un sistema de problemas> <que impulsa la evolución del sistema>	Extraer la limitación de recursos de los problemas del STF
	<reconocer>	Definir un conjunto de soluciones que direccionen las limitaciones de recursos
	<tendencias evolutivas>	Ajustar serie de datos sobre parámetros de medición de rendimiento y gastos
	<para el sistema identificado>	
	<identificar> <cambios de rendimiento característicos en el tiempo>	Construir conclusiones sobre los rasgos futuros del STF
	<agregar y validar>	
	<resultados de estudios cualitativos y cuantitativos>	
	<dentro del pronóstico>	
T: Preparar el informe y presentar los resultados	<transferir> <resultados del estudio> <a los tomadores de decisiones>	Transferir los resultados del pronósticos los beneficiarios / tomadores de decisiones

Tabla 2: Breve descripción de las etapas de la metodología FORMAT.

La Etapa M se refiere a la definición de los límites para el pronóstico y el análisis de los conocimientos existentes relevantes sobre la tecnología o el sistema en estudio. Para abordar esta revisión, los analistas deben producir: i) una descripción ASIS de la tecnología y su contexto; ii) una lista de desempeño y gastos (recursos) relevantes para la tecnología; iii) una descripción de tecnologías alternativas (un conjunto) que ofrecen los mismos resultados. Esta etapa debería dar como resultado una visión completa de la tecnología y los contextos en los que opera.

Las actividades de la Etapa A consideran tanto una perspectiva cualitativa como cuantitativa para pronosticar el futuro. El enfoque cualitativo se detalla en una generación de conocimiento sobre el futuro centrada en el problema y en una solución. El primero define los problemas críticos y los recursos que limitan el desarrollo tecnológico (por ejemplo, utilizando los conceptos TRIZ de contradicciones y recursos). Este último tiene como objetivo pronosticar por el razonamiento analógico las potenciales evoluciones que abordan tanto los problemas identificados como la falta de recursos del sistema. El enfoque cuantitativo se basa en la serie de datos de análisis de rendimiento y gastos (por ejemplo, mediante la aplicación del análisis de regresión como curva de crecimiento logística (Dmitry Kucharavy et al., 20015), (Perrin Meyer et al., 1991).

Eventualmente, la etapa T tiene como objetivo transferir los resultados del pronóstico a los beneficiarios del proyecto. Los analistas tienen que desarrollar un sistema de flujo de conocimiento adecuado para transferir sus resultados a los beneficiarios, tales como informes, presentaciones, listas, carteles, etc. Esta última etapa no debe pasarse por alto: de hecho, el proceso de formular un pronóstico tecnológico es similar a un proceso de aprendizaje. La diferencia con respecto al aprendizaje estándar es que los miembros del equipo adquieren conocimiento sobre el futuro, más que sobre el pasado. Esto implica que los beneficiarios de un proyecto de TF, es decir, los tomadores de decisiones que se supone deben usar esos resultados para definir estrategias y planes, enfrentan la interpretación de información que no contribuyeron a construir. Aquí pueden surgir dos escenarios opuestos: o bien el pronóstico es totalmente plausible, pero en este caso las ventajas derivadas de la TF revelan ser bastante limitadas, o el pronóstico suena inesperado. Este último caso, si el TF se confirma recientemente, ofrece las mayores ventajas, pero claramente los argumentos adecuados deben proporcionarse para obtener confianza. A su vez, la etapa T tiene el rol de proporcionar contenidos significativos y argumentos sólidos en una forma concisa.

12. Caso de estudio y aplicación

El caso de estudio corresponde a la industria del cobre en Chile, específicamente al proyecto de clasificación de minerales por medio de sensores, el cual consiste en seleccionar minerales y separarlos de acuerdo a ciertas características propias del mineral con el objetivo de aminorar costos de producción. En la actualidad este tipo de tecnologías es utilizado en distintas industrias mineras fuera del país, pero asociada a elevados costos debido a la alta tecnología usada en los sensores, además de la cantidad de cámaras que se necesitan para poder abarcar las considerables cantidades de flujo de material.

A continuación se procede a responder cada una de las etapas compuestas por FORMAT, ajuntando una imagen que representará una breve descripción de la etapa y sus correspondientes sub-etapas.

12.1.FOR

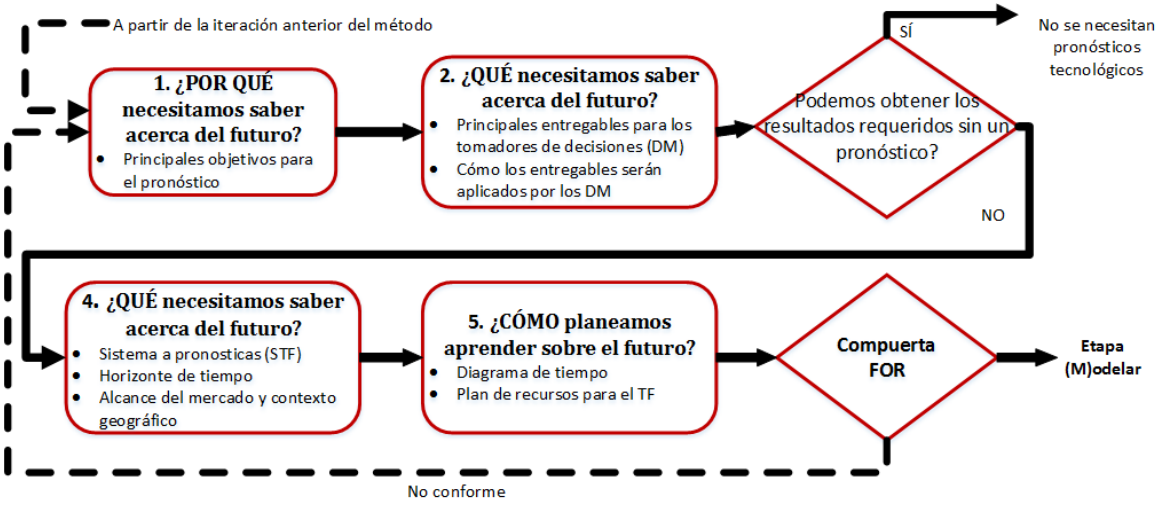


Figura 3: Diagrama de la etapa FOR y sus sub-etapas.

12.1.1. FOR_1: Formular objetivos

¿Por qué necesitamos saber acerca del futuro?

El objetivo de encontrar una adecuada tecnología para el proceso de separación de minerales radica en la necesidad de abaratar costos de producción del cobre, los que han aumentado considerablemente en los últimos 10 años, entre 2005 y 2014 los costos de

operación han aumentado un 10% en promedio por año, mientras que la productividad ha disminuido alrededor de 20% (Fundación Chile, 2016).

Este aumento en el costo de producción se debe tanto a la escasez de agua como a los altos costos por energía derivados de una baja cantidad de proyectos energéticos en el país. No obstante, en el 2011, en Chile se agregó otro factor adicional: la baja ley del mineral que se está extendiendo por el envejecimiento de los yacimientos más grandes del país.

El proceso de separación de minerales, pertenece a un proceso más complejo referido al concentrado de minerales. Es esta etapa de la extracción del cobre que consume más electricidad (BCS, Incorporated, 2007) y la segunda a nivel global de consumo de recursos luego de la etapa de extracción en mina.

El poseer una tecnología capaz de separar rocas según su ley con mayor exactitud, permitirá que al proceso de molienda lleguen rocas sólo de una ley mayor, por lo que se dejará de incurrir en gastos extras al procesar una menor cantidad de rocas (pero de una ley más alta) y por ende existirá un ahorro, tanto de energía y agua como de disponibilidad de máquinas.

12.1.2. FOR_2: Definir los entregables esperados

¿Qué necesitamos saber acerca del futuro?

Siendo la industria minera (en Chile y en todo el mundo) un sector de producción intensiva y conservadora, la adopción y la implementación de nuevos avances tecnológicos requiere mucho tiempo y tiene que afrontar varios desafíos (Christopher Nikulin et al., 2016). Debido a lo anterior, es que las tomas de decisiones deben estar debidamente justificadas para no caer en errores que podrían costar una fortuna y que incluso podrían ser irreversibles.

Mencionado esto, es que se requerirá que la industria responda las siguientes preguntas una vez finalizado el estudio: ¿Algún día el cobre repetirá el colapso de la industria calichera?, ¿Cuántos años de explotación de las reservas de cobre chilenas quedan?, ¿Surgirán nuevas alternativas de extracción minera?

Una vez resueltas estás interrogantes se deberá determinar cuáles serán las posibles tecnologías que podrían aplicarse en este proyecto en particular y formular una ficha técnica comparativa; así se facilitará la generación de un análisis más exhaustivo acerca de las ventajas y desventajas de cada una, tanto en el ámbito técnico, como económico y financiero.

Para seleccionar dichas tecnologías se debe determinar en primer lugar cuáles se encontrarán obsoletas dentro de 30 años más (2017-2047), ya que de ser así, éstas no serán consideradas dentro del análisis. Esto debido a que la minería es un negocio intensivo en capital y muchas de las tecnologías de molienda y fundición tienen una vida útil larga, comúnmente sobre los 30 años, por lo que se habla de una inversión a largo plazo y por ende es un parámetro importante y que se debe considerar en el análisis.

La tecnología elegida deberá responder a las siguientes problemáticas que existen hoy en día en la industria:

- Análisis de la configuración de minerales en tiempo real.
- Clasificación de minerales según su composición.
- Adaptación a flujos manejados por la industria.

Por otro lado se debe analizar las políticas tanto de Chile como internacionales acerca de la escasez de recursos (leyes ambientales), ya que si la tecnología escogida no cumple con las normas impuestas para ese entonces o dentro del horizonte de tiempo de implementación la empresa podría incurrir en problemas legales.

12.1.3. FOR_3: ¿Pronosticar o no pronosticar?

¿Podemos obtener los resultados requeridos sin hacer un pronóstico tecnológico?

Actualmente la ley promedio de un depósito se calcula sobre la base del promedio ponderado de ensayes de un gran número de muestras recolectadas del depósito (superficie, canales, sondajes, etc.) y a menudo usando procedimientos estadísticos sofisticados (geoestadística); su estimación será más exacta y confiable a mayor densidad de muestreo (Marco Antonio Alfaro Sironvalle, 2017).

Hasta el día de hoy el movimiento de material tanto el estéril como el mineral de baja ley se realiza siempre siguiendo una secuencia de las siguientes operaciones unitarias: perforación, tronadura y carguío, y transporte (Portal Minero, 2006).

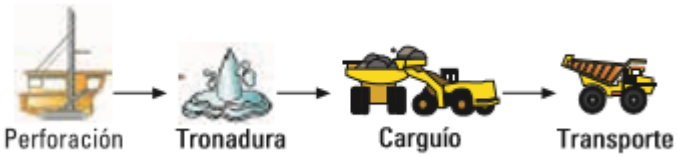


Figura 4: Procesos para la extracción de mineral.
Fuente: (Portal Minero, 2006).

No existe instancia entre los procesos en que el mineral sea separado según su ley por medio de alguna maquinaria, por lo que el material de menor ley es tratado de la misma forma que el material con una ley mayor, generando un gasto de recursos extra al procesar material que no es de interés en la planta de beneficio.

Al día de hoy no se ha implementado en la minas de cobre chilenas una tecnología capaz de separar el mineral según su ley, es por esto que se vuelve imprescindible realizar un

pronóstico tecnológico, para lograr satisfacer esta necesitad en la industria y así disminuir los costos de producción.

12.1.4. FOR_4: Formular preguntas

¿Qué necesitamos saber acerca del futuro?

En la industria minera el tiempo de desarrollo para elaborar y comercializar nuevos equipos es típicamente del orden de 7-10 años (G. Hilson, 2000), mientras que invertir en nuevas tecnologías a menudo implica altos costos de I+D de capital, debido a la gran escala y complejidad de los equipos de movimiento de tierras y la necesidad de coordinar la adquisición de tecnología con los planes de desarrollo de la mina (D. J. Peterson 2001). Esta información servirá para definir el alcance de este estudio, donde se considerará un horizonte de tiempo de 10 años ya que al ser la industria minera (en Chile y en todo el mundo) un sector de producción intensiva y conservadora, la adopción e implementación de nuevos avances tecnológicos requiere mucho tiempo y tiene que afrontar varios desafíos (Christopher Nikulin et al., 2016).

Siguiendo con la definición del contexto del análisis, el estudio se aplicará a mineras de cobre ubicadas en el norte de Chile, para que la ubicación (asociado al clima, topografía superficial, forma, Etc) no afecte en el resultado final del análisis.

12.1.5 FOR_5: Planificación del proyecto

¿Cómo planeamos aprender sobre el futuro?

a. Lista de recursos

Primero que todo cabe destacar que el desarrollo de la aplicación de la metodología FORMAT no se realizó en conjunto de ninguna empresa dedicada a la minería, sino que a través del Centro Tecnológico de Valparaíso de la Universidad Técnica Federico Santa María (CCTVal), centro de categoría mundial que busca impulsar el descubrimiento de nuevo conocimiento en física de partículas y en ingeniería aplicada a la alta tecnología, con el fin de impactar de manera positiva en la sociedad. Es por esto que el recurso humano de analistas lo proveerá el Centro, específicamente de alumnos en calidad de memoristas, guiados por científicos del mismo CCTVal, cuyas áreas de investigación son: física teórica de partículas, física Experimental de alta energía, electrónica, informática y computación.

Dentro de los actores definidos por FORMAT están los usuarios y beneficiaros, que para este caso de estudio el primero corresponderán los proveedores de la industria minera, dedicados a la fabricación de alta tecnología. Finalmente los beneficiarios serán las empresas mineras instaladas en el norte de Chile.

b. Programa

En cuanto a la periodicidad de las reuniones, estás seguirán el formato que ofrece la metodología:

Nombre de la etapa	Duración [días]	N° de sesiones de trabajo [sesiones]	Recursos
FOR	3	1	beneficiarios, usuarios,2-3 analistas
M	15	4	2-3 analistas
A	21	5	2-3 analistas
T	6	2	beneficiarios, usuarios,2-3 analistas

Tabla 3: Número de sesiones y duración de las etapas en la metodología FORMAT.

La carta Gantt fue modificada de acuerdo a la disponibilidad de los analistas, que en esta ocasión fue principalmente la autora del presente informe.

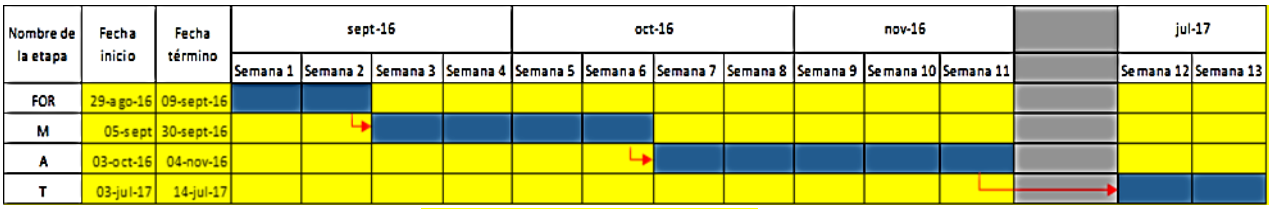


Tabla 4: Carta gantt del proyecto.

12.1.6 Compuerta FOR

Con el objetivo de proceder a la siguiente etapa, se analizó los ítems de la siguiente lista de verificación para corroborar si todas las actividades requeridas se realizaron según lo solicitado por la metodología FORMAT:

- ✓ Principales objetivos del pronóstico (Proyecto) (¿Por qué?) – hecho en el paso FOR_1
- ✓ Definición de elementos de conocimiento para la aplicación de los resultados de las previsiones – hecho en el paso FOR_1
    - ✓ Productos principales para los tomadores de decisiones (DM) (¿Qué?) – hecho en el paso FOR_1
    - ✓ ¿Cómo se aplicarán las salidas por DM? (enlace entre ¿Por qué-qué?) – hecho en el paso FOR_2
- ✓ VERIFICACIÓN INTERMEDIA: ¿Podemos obtener los resultados requeridos sin pronóstico? – hecho en el paso FOR_3
    - ✓ Ir / No Ir -> al proyecto de pronóstico – hecho en el paso FOR_3
- ✓ Definición de limitaciones preliminares para el proyecto
    - ✓ Sistema (Proceso) a ser pronosticado (STF) desde perspectivas tecnológicas, económicas, ambientales y sociales (TEES) (¿Qué?) – hecho en el paso FOR_4
    - ✓ Horizonte horario (¿Cuándo?) – hecho en el paso FOR_4

    - ✓ Alcance del mercado y contexto geográfico (¿Dónde?) – hecho en el paso FOR_4
- ✓ Lista de Preguntas para la Predicción (Preguntas que deben ser contestadas al final del estudio) – hecho en el paso FOR_4
- ✓ Plan de Proyecto (¿Cómo?) – hecho en el paso FOR_5
    - ✓ Diagrama de tiempo (Gantt o similar) – hecho en el paso FOR_5
    - ✓ Recursos para la actividad (Personas, conocimiento, instrumentos de TI)) – hecho en el paso FOR_5

12.2 M

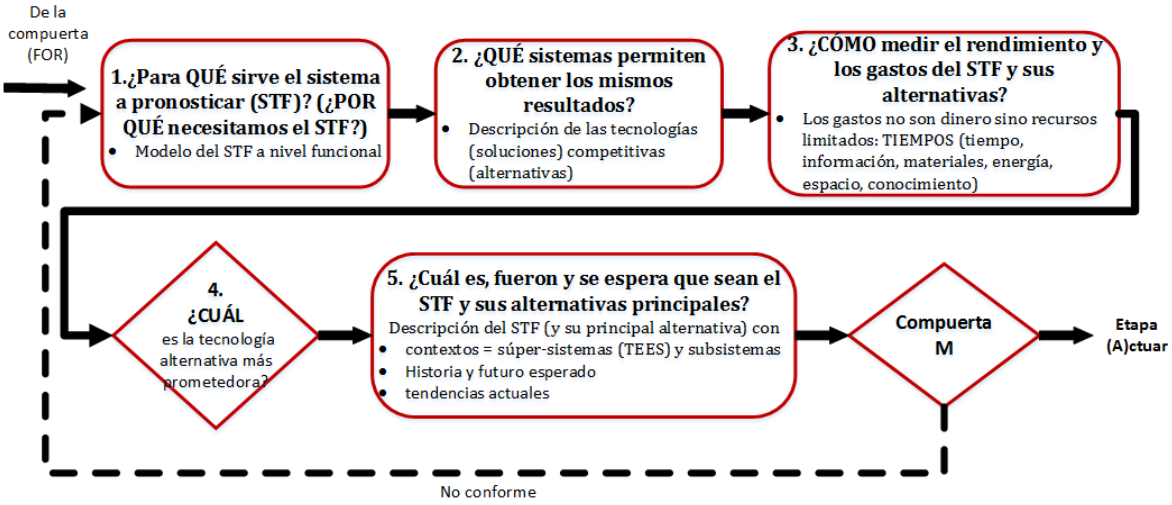


Figura 5: Diagrama de la etapa M y sus sub-etapas

12.2.1 M_1: Definir el sistema a pronosticar

¿Para qué sirve el sistema a pronosticar (STF)? (¿POR QUÉ necesitamos el STF?)

Para comprender de mejor manera cuál es el sistema que se debe pronosticar, se debe entender el contexto de trabajo, es por esto que se detallarán en primer lugar, los procesos productivos de una mina descritos en (Portal Minero, 2006).

Perforación

El objetivo del proceso de perforación es hacer una cavidad definida dentro de la roca que será removida, para luego colocar el explosivo que más tarde será detonado. Una vez que se han definido los puntos a perforar y se tiene acceso al sector de trabajo, el equipo toma posición para iniciar la operación. Fundamentalmente lo que se hace es perforar la roca según las especificaciones técnicas de operación, malla, profundidad, diámetro e inclinación.

Tronadura

El objetivo del proceso tronadura es fragmentar la roca de tal manera que quede de un tamaño suficientemente pequeño, en general menor que 1 [m] de diámetro, para ser cargada y transportada por los camiones mineros a los botaderos o al chancado primario, en donde se inicia el proceso de reducción.

Lo que se hace en esta operación es introducir el explosivo en los pozos de perforación, con sus respectivos accesorios. Se establece una secuencia de detonaciones entre los distintos tiros de una tronadura, de manera que la roca sea fragmentada en etapas partiendo de la cara expuesta del banco hacia adentro, con diferencias de tiempo de fracciones de segundo entre cada detonación.

La tronadura es el primer proceso de conminución que se aplica al material, por lo que su éxito permitirá realizar un buen manejo de este material por parte de los procesos posteriores, principalmente en el chancado.

La granulometría que se obtendrá depende de las características de la roca misma y de la energía que se le aplique, por lo que si se desea una granulometría fina hay que utilizar mayor cantidad de explosivos o aumentar la potencia de la tronadura

Carguío y transporte

El objetivo de este proceso es cargar el material tronado en camiones de gran tonelaje mediante palas eléctricas, hidráulicas o cargadores frontales. Estos equipos llenan los camiones en una operación continuada desde que queda disponible el banco después de la tronadura.

Las palas eléctricas tienen capacidad para cargar hasta 100 toneladas de material de una sola vez, por lo que realizan habitualmente tres movimientos o pases para cargar un camión. Los cargadores tienen menor capacidad y en minas de gran tamaño son utilizados sólo para trabajos especiales.

Esta es una de las operaciones de mayor costo, debido a que es el proceso con mayor cantidad de equipos y menor rendimiento productivo por equipo. El costo de este proceso varía entre el 45% y el 65% del costo mina, razón por la que se debe garantizar un ambiente de operación apto para maximizar el rendimiento de estos equipos (el carguío oscila entre un 10% y un 20% del costo y el transporte, entre un 35% y un 45%).

Por lo general se debe cargar en más de una zona, por lo que mientras los equipos de carguío y transporte operan en un sector, los equipos de apoyo están preparando otro.

Eventualmente si dentro del plan minero existe una zona estacionaria que genere una plataforma en donde se pueda instalar un chancador y permita un layout de correas trasportadoras, se podrá optimizar el manejo de materiales, específicamente con zonas de mineral y estéril en aquellas expansiones más profundas; siempre que se trata de una mina a rajo abierto.

Los camiones trasladan el material a botaderos de estéril, acopios de mineral con baja ley, acopios de mineral para lixiviación, acopios de mineral de alta ley, chancado, etc., donde procederán a descargar el material y retornar a la operación de carguío.

Servicios mina

El objetivo de este proceso es mantener la faena en condiciones operativas, garantizando que las operaciones unitarias se realicen con el mejor rendimiento y el mínimo riesgo.

Las principales actividades de los servicios mina son:

- Preparación de sellos para carguío.
- Construcción, habilitación y mantención de caminos y accesos.
- Mantención de botaderos.
- Limpieza en sectores específicos.
- Manejo de materiales no mineros.
- Apoyo directo a operaciones de carguío y transporte.

Esta operación tiene costos que fluctúan entre un 12 % y un 20 % del costo global de la operación de la mina.

Tras pasar por las operaciones unitarias del proceso de extracción ya nombradas, el flujo de material comienza el proceso de reducción en la planta de beneficio (Figura 6). En el caso de las rocas de alta ley (material de mayor valor para las mineras), una vez que llegan a planta, el flujo se transfiere a los chancadores giratorios que reducen su tamaño. Este mineral triturado es transportado al circuito de molienda. Los molinos de minería suelen estar compuestos de bolas de trituración para ayudar al proceso de molienda (la fricción y los impactos que ocurren entre las bolas y el mineral generan la acción de molienda).

Obviamente, el tipo de chancador y los molinos de minería utilizados en el proceso pueden variar. Después de la fase de molienda, el mineral entra en las células de flotación que permiten la recolección de los minerales por medio de acciones químicas generadas por reactivos "colectores" específicos. Se podrían utilizar varias etapas de flotación para aumentar la concentración de la espuma que contiene el mineral. El tamaño y la potencia del molino han aumentado significativamente desde su creación en la década de 1920, actualmente alcanzando más de 40 pies de diámetro. También implican el mayor porcentaje de costos operativos y las operaciones de mantenimiento que consumen la mayoría del tiempo (aproximadamente 200 horas al año). Además la mantención requiere de mano de obra, recursos y varios días de paralización: en condiciones normales de operación en una planta que procesa 100 [kton/ día], el costo de la interrupción es de aproximadamente US $270.000 por día (Christopher Nikulin et al. 2016).

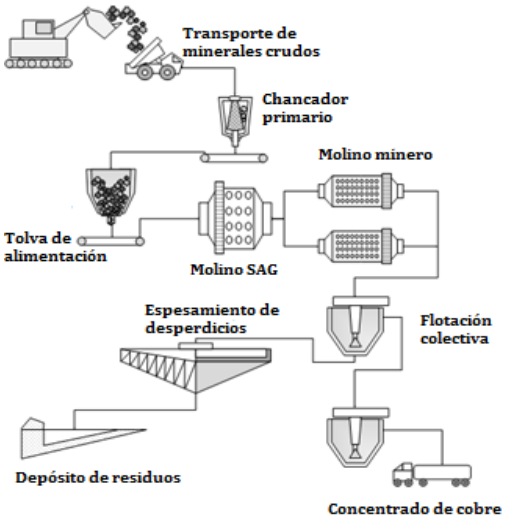


Figura 6: Proceso general de minería para la industria del cobre.
Fuente: (Christopher Nikulin et al. 2016).

La observación que se puede extraer al analizar todos los procesos productivos del cobre es que no existe una fase implementada para la clasificación de dicho mineral de acuerdo a su ley de manera formal.

12.2.2 M_2: Identificar alternativas

¿Qué sistemas permiten obtener los mismos resultados?

La clasificación de mineral, con el fin de separar de acuerdo a la ley que éste posea, se ha realizado manualmente por siglos, identificando la mineralización en la superficie de las piedras de forma individual. No obstante, la tecnología moderna permite observar más allá de la superficie y en diferentes rangos espectrales (Joseph Lessard, 2014). Salter y Wyatt (1991) determinaron que el proceso de clasificación puede dividirse en cuatro subprocesos: i) Presentación de partículas; ii) Examen de partículas; iii) Análisis de datos; iv) Separación de partículas (Figura 7).

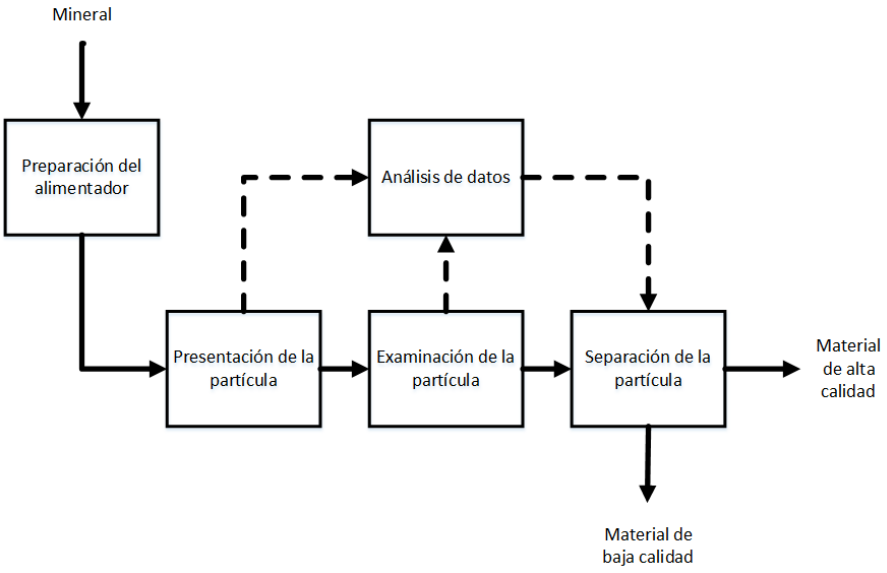


Figura 7: Configuración general de una máquina de clasificación y sus subprocesos.

Aunque originalmente se aplicó a la clasificación de uranio y piedras preciosas, la tecnología de clasificación basada en sensores ha sido impulsada a un alto rendimiento por la enorme demanda de reciclaje y el rápido desarrollo de técnicas de procesamiento de datos y detección.

La variedad de nuevas generaciones de sensores diferentes permiten una implementación técnica y financieramente viable para resolver cada vez más tareas de clasificación para todos los “commodities”. Además, la clasificación por sensores es una técnica de procesamiento limpia y verde, que requiere poca o ninguna cantidad de agua y poca potencia, en comparación con otras técnicas de preconcentración (Joseph Lessard, 2014).

El proceso de clasificación comienza con el mineral, el cual es ingresado al clasificador por medio un alimentador para asegurar una monocapa de partículas estables y ser presentado al sistema de detección (presentación de la partícula). El sistema de detección envía los datos que caracterizan cada roca al procesador (examinación de la partícula), luego los datos son analizados por el módulo del procesador y discrimina el mineral del desperdicio (análisis de datos). Finalmente, la información se pasa a los eyectores y es separado por ellos en una corriente de desecho y de mineral (separación de la partícula). El tamaño de la partícula, que se ha de clasificar eficazmente, depende de la resolución espacial del sensor. El rango de tamaño es entre 1-300 [mm], por lo que la relación de tamaño de partícula mínimo y máximo no debe exceder de 1: 3. El rendimiento se condiciona por el tamaño de las partículas y la tecnología de clasificación utilizada (Knapp et al., 2014). Se aplica normalmente después de la molienda secundaria.

Con respecto a los datos adquiridos por el sistema de detección, éstos se evalúan mediante algoritmos de clasificación previamente definidos. El algoritmo describe parámetros para una decisión: "sí" (partículas aceptadas) o "no" (partículas rechazadas). Para tomar la decisión, todos los parámetros de los datos multidimensionales (información espacial e

información de las propiedades) pueden ser evaluados y combinados para introducir patrones y combinaciones de propiedades en algoritmos de clasificación, inteligentes y confiables. Los operadores pueden cambiar los algoritmos de clasificación activos en cuestión de segundos. Cuando se programan diferentes algoritmos y programas en una máquina, se pueden resolver tareas de clasificación completamente diferentes en una máquina, por ejemplo, creando un preconcentrado grumoso o rechazando residuos puramente estériles (Joseph Lessard et al., 2014).

Las máquinas clasificadoras se dividen en dos tipos: clasificador de correa transportadora o clasificador de chute, como se muestra en la Figura 8. En la máquina de tipo correa, el sensor está por encima de la correa, donde la roca se mueve hacia adelante al módulo de separación. Este tipo de clasificador tiene una presentación de alimentador más estable, haciéndola aplicable para aplicaciones más difíciles y heterogéneas. Mientras que el de tipo chute detecta la partícula mientras que está cayendo de la correa. De esta manera, la partícula puede ser detectada en dos lados (Harbeck, 2008).

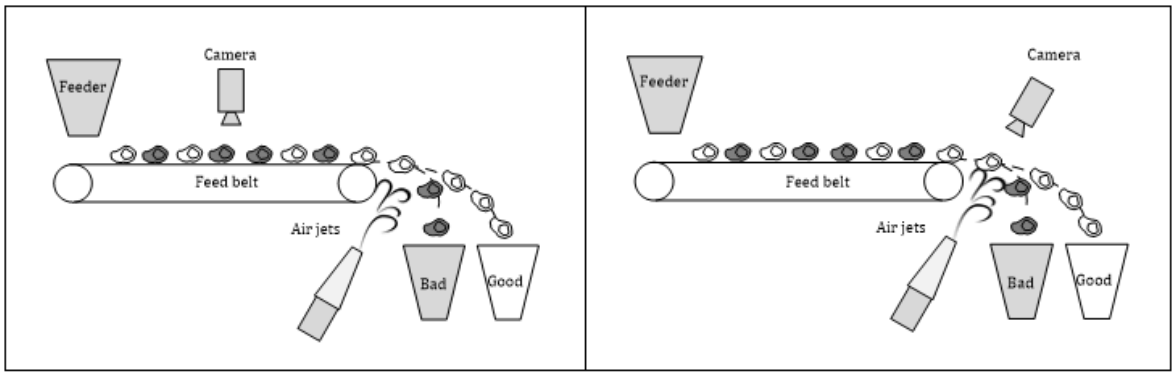


Figura 8: Tipos de máquina clasificadora (imagen de la izquierda: sistema de correa transportadora con separación neumática, imagen de la derecha: Sistema de chute con separación neumática).

A continuación se presentará un estudio realizado por académicos y estudiantes del Centro Tecnológico de Valparaíso de la UTFSM "*A Framework of Sorting Technologies and Its Applicability to Copper Mining*" (Christopher Nikulin et al., 2016) en el que se analizan y describen las tecnologías existentes en el proceso de clasificación para la examinación de partículas a nivel general.

	General Description
Sensor radiométrico **longitud de onda:** $\mathbf{10^{-12} - 10^{-11}}$**[m]**	La detección radiométrica se basa en la medición de la radiación natural del mineral, por lo que se utiliza principalmente en minas de uranio. Cada tipo de material tiene una radiactividad natural diferente, por lo que se puede utilizar como un indicador para separar uno de otro. El principio de la detección radiométrica se basa en la emisión de fotones, ya que el material es irradiado por una alta radiación, como la radiación γ. Los fotones emitidos son dirigidos a un cátodo sensible a la luz, que causa la liberación de electrones y luego se convierte en una señal (Knapp et al., 2014).

Transmisión de rayos X **longitud de onda:** $\mathbf{10^{-10} - 10^{-8}}$**[m]**	La función de transmisión de rayos X (XRT) se basa en la absorción de rayos X de las partículas. Esta absorción depende de las variaciones del número atómico de los elementos contenidos. Este tipo de tecnología de rayos X se puede comparar con el escáner de equipaje de seguridad de rayos X en el aeropuerto. La clasificación por XRT necesita penetrar cada partícula en la correa transportadora. Las radiografías atenuadas se detectan mediante un escintilador de exploración lineal en el lado inferior de la correa (Knapp et al., 2014).
Fluorescencia de rayos X **longitud de onda:** $\mathbf{10^{-10} - 10^{-8}}$**[m]**	La fluorescencia de rayos X (XRF), funciona con el principio fotoeléctrico. Los impactos de radiación de rayos X sobre el material y los electrones se emiten debido a la alta energía de la radiación incidente. Entonces, la vacante creada por el electrón es rellenada por una transición electrónica de un orbital exterior. La energía es obtenida durante este proceso y se emite como radiación de fluorescencia secundaria. Esta radiación de rayos X secundaria es específica para cada elemento. De este modo, con un detector especial, es posible determinar la composición elemental del material dirigido (Knapp et al., 2014).
Sensores de visibilidad/ color **(Laser Óptico)** **longitud de onda:** $\mathbf{10^{-7} - 10^{-5}}$**[m]**	La clasificación óptica se basa en la detección de diferencias de color, transparencia, brillo y forma de la superficie de las partículas en la región de la luz visible. Después de la adquisición de datos, las imágenes se analizan y comparan con las clases de color, brillo, transparencia y / o forma previamente especificadas. Por lo tanto, es posible realizar la identificación y caracterización de diferentes tipos de materiales.
Infrarrojo cercano (NIR) **longitud de onda:** $\mathbf{10^{-4}}$**[m]**	El infrarrojo cercano (NIR) se basa en la reflectancia cuando una superficie se ilumina con luz NIR. Las propiedades vibratorias de los grupos químicos funcionales crean características de absorción mientras que la accesibilidad de las partículas a la radiación determina el nivel de reflectancia (Hunt, 1979, Pasikatan et al., 2001). Como resultado de la radiación reflejada a longitudes de onda entre 780-2500 [nm], se puede determinar la composición mineralógica.
Infrarrojo térmico **longitud de onda:** $\mathbf{10^{-3} - 10^{-1}}$**[m]**	Pocos minerales de sulfuro son fácilmente reconocibles por su roca huésped, que descarta la clasificación óptica. Debido a eso, es necesario analizar toda la roca. La tecnología infrarroja térmica es posible debido a que la roca se calienta o se enfría, dependiendo de su composición y propiedades de superficie óptica. Por lo tanto, la energía necesaria para el calentamiento puede ser pequeña, ya que los sensores de infrarrojos actuales pueden detectar diferencias de temperatura muy pequeñas (Van Weert & Kondos, 2007).
Sensores electromagnéticos / inductivos **longitud de onda:** $\mathbf{10^{3} - 10^{4}}$**[m]**	Los sensores electromagnéticos utilizan la interacción entre metales y campos magnéticos como criterio. Los sensores electromagnéticos constan de dos elementos principales: una bobina transmisora y una bobina receptora. La bobina transmisora crea un campo electromagnético alterno que interactúa con la partícula metálica situada cerca de la bobina. Esta interacción se mide utilizando la bobina receptora, a partir de la cual se obtiene una señal (Mesina, De Jong, & Dalmijn, 2003).

Tabla 5: Descripción general de las tecnologías de clasificación usadas en diferentes industrias mineras.
Fuente: (Christopher Nikulin et al., 2016)

El clasificador basado en sensores debe ser condicionado para el proceso de detección y separación. Para todas las aplicaciones y técnicas de detección, la alimentación se debe tamizar en intervalos de tamaño, con una relación entre el tamaño máximo de partícula y el tamaño mínimo de partícula 1:3. Esta relación se denomina coeficiente de tamaño de rango y es una cifra clave utilizada para describir la aplicabilidad de la clasificación basada en sensores a una fracción. La relación es una cifra empírica; si es demasiado alta, la precisión de la detección disminuye porque las partículas grandes pueden cubrir las pequeñas. Para la separación mecánica, una proporción alta es también desventajosa porque las partículas pequeñas pueden ser arrastradas a la fracción rechazada por turbulencia en la cámara de rechazo cuando se rechazan las partículas más grandes. (Joseph Lessard et al., 2014).

12.2.3 M_3: Medición de rendimiento

¿Cómo medir el rendimiento y los gastos del STF y sus alternativas?

A continuación se enumeran los parámetros que servirán como punto de comparación entre las alternativas a utilizar en el sistema a pronosticar, para facilitar la selección de manera que arroje la alternativa más óptima para el sistema. Dichos parámetros se dividirán en dos tipos: funcionamiento y costos (en cuanto a costos, no sólo se habla en términos monetarios, sino también en términos de límites de recursos como tiempo, mano de obra, información, materiales, energía, Etc.).

#		Problema	Parámetro
1	Funcionamiento	Grandes cantidades de material que debe ser procesado	Capacidad de procesamiento [ton/hr]
2			Tamaño de la roca (partícula) para que el sensor de la tecnología funcione correctamente [mm]
3		Seguridad de los trabajadores	Número de operadores [personas]
4			¿Operador trabaja directamente con el material a procesar? [Sí o No]
5		Obtención de datos	Rapidez de captación en información [seg]
6		Grandes niveles de contaminación producidos por la industria minera	Contaminación producida [ppm/día]
7		Precisión	Resolución de la cámara [mm]
8	Costos	Línea de producción no debe detenerse por mucho tiempo ya que significa enormes pérdidas monetarias	Duración de la mantención [hr]
9			Tiempo entre mantenimientos [hr]
10			Disponibilidad de repuestos [hrs]
11		Presupuesto	Costo unitario de la tecnología [$]
12			Consumo de energía [kWh]
13		Tiempo	Vida útil [año]

Tabla 6: criterios de comparación.

En la figura 6, se presentó el proceso general de extracción de cobre, con el fin de establecer dónde se puede implementar la potencial tecnología de clasificación, la cual será después del proceso de molienda secundaria, ya que es la decisión más común tomada en las industrias de minerales donde ya se ha aplicado este tipo de tecnología. Además, una descripción general según el proceso de clasificación (Salter y Wyatt, 1991) debería ayudar a comprender las principales limitaciones para la tecnología más conveniente.

En la tabla 7 se presenta una nueva comparación entre las tecnologías de clasificación, con el fin de comprender las principales barreras en la industria minera del cobre considerando una perspectiva más holística; análisis el cual pertenece al mismo documento "*A Framework of Sorting Technologies and Its Applicability to Copper Mining*" (Christopher Nikulin et al., 2016) mencionado anteriormente.

	Etapa inicial	**Dentro de la explotación minera**		**Funcionamiento exterior**
	Pozo de minería	**Trituradora (Primaria o Secundaria)**	**Sag/Molino minero**	**Vertedero de residuos/ Depósito**
Sensor radiométrico (Factibilidad dudosa para el cobre)	EP: Uno por uno SP: Identificación del área AD: Logística de la planta minera	PA: Medición global de partículas PP: Transportador PE: Radiación de mineral específico PS: Lote o chorro de aire AD: Periodos largos de tiempo	PP / EP: Limitaciones en el tamaño de las partículas SP: Por grupo (mecánico)	PP: Es necesario tener el tamaño adecuado para el análisis. SP: Por grupo (mecánico)
Transmisión de rayos X	PE: Uno por uno (puntos) PS: Identificación del área AD: Logística de planta minera y penetración de mineral.	FP: Medición global de partículas PP: Transportador EP: Número atómico de identificación de los elementos contenidos SP: Lote o chorro de aire AD: caudal máximo registrado (100 [t/h])	PP / EP: Limitaciones en el tamaño de la partícula PS: Lote (mecánico)	PP: Es necesario tener el tamaño adecuado para el análisis. SP: Lote (mecánico)
Fluorescencia de rayos X	EP: Uno por uno (puntos) SP: Identificación del área AD: Logística de planta minera y superficie del mineral	PA: Medición de superficie PP: Iluminación adecuada (canal o transportador) EP: Longitud de onda apropiada liberada por el elemento primario SP: Lote o chorro de aire AD: caudal máximo registrado 30 [t/h]	PP / EP: Limitaciones en el tamaño de la partícula SP: Lote (mecánico)	PP: Es necesario tener el tamaño adecuado para el análisis. SP: Lote (mecánico)
Sensores de visibilidad/ color (Limitación para la identificación del cobre)	EP: Uno por uno (puntos) SP: Identificación del área AD: Logística de planta minera y superficie del mineral	PA: Medición de superficie PP: Iluminación adecuada (canal o transportador) EP: Longitud de onda apropiada liberada por el elemento primario SP: Lote o chorro de aire AD: caudal máximo registrado 300 [t/h]	PP / EP: Limitaciones en el tamaño de la partícula PS: Lote (mecánico)	PP: Es necesario tener el tamaño adecuado para el análisis. SP: Lote (mecánico)

NIR (Amplio espectro para detección de materiales)	EP: Uno por uno (puntos) PS: Identificación del área AD: Logística de planta minera y superficie de mineral	PA: Medición de superficie PP: Iluminación adecuada (canal o transportador) EP: Longitud de onda apropiada liberada por el elemento primario SP: Lote o chorro de aire AD: caudal máximo registrado ~ 300 [t/h]	PP / EP: Limitaciones en el tamaño de la partícula SP: Lote (mecánico)	PP: Es necesario tener el tamaño adecuado para el análisis. PS: lote (mecánico)
Infrarrojo térmico	-	PA: Medición global PP: transportador PE: Comportamiento térmico adecuado (sensibilidad a 1 [°C]). PS: Lote o chorro de aire AD: caudal máximo registrado ~ 300 [t/h]	PP / EP: Limitaciones en el tamaño de la partícula SP: Lote (mecánico)	PP: Es necesario tener el tamaño adecuado para el análisis. SP: Lote (mecánico)
Sensores electromagnéticos / inductivos	EP: Por áreas de medición SP: Identificación del área AD: Logística de planta minera y penetración del mineral.	PA: Medición global PP: Campo electromagnético. (Transportador) EP: Análisis del campo electromagnético inducido SP: Transportador Lote o chorro de aire AD: caudal máximo registrado ~ 300 [t/h]	PP / EP: Limitaciones en el tamaño de la partícula SP: Lote (mecánico)	PP: Es necesario tener el tamaño adecuado para el análisis. SP: Lote (mecánico)

Tabla 7: Clasificación de tecnologías y comparación con la minería y los procesos de clasificación relacionados.
(PA: Preparación del alimentador; PP: Preparación de partícula = transportador o tolva; EP: Examen de partículas; SP: Separación de partículas = mecánica o por válvulas de aire; AD: Análisis de datos).
Fuente: (Christopher Nikulin et al., 2016)

12.2.4 M_4: Seleccionar alternativa

¿Cuál es la tecnología alternativa prometedora?

La clasificación basada en sensores es una herramienta diversa y flexible para separar partículas gruesas en base a distintitas propiedades físicas y químicas. La clasificación basada en sensores puede contribuir en gran medida a aumentar la utilización general de recursos, especialmente en depósitos de baja ley. El mayor uso que se le da a esta tecnología es la de selección de material en base al tamaño de sus partículas con el objetivo de reducir los costos de procesamiento. Sin embargo, es posible aplicarla en otras áreas, como el retiro de basura o la desviación del tipo de mineral. La clasificación basada en sensores se puede aplicar en áreas con climas áridos o árticos, debido a su bajo o nulo consumo de agua. Los proyectos de investigación actuales se centran en diferentes aspectos de la clasificación basada en sensores, como el desarrollo de sensores, el aumento del rendimiento, nuevos algoritmos de

procesamiento de imágenes, como el reconocimiento de formas y patrones, y el impacto económico de la clasificación por sensor en toda la cadena de procesos. Otro proyecto de investigación se refiere al modelado y predicción de los resultados de clasificación, basado en el análisis del núcleo de perforación. Estos ejemplos muestran la viabilidad de la clasificación basada en sensores para aumentar la eficiencia energética y la utilización de recursos en la producción de materias primas a nivel mundial. En última instancia, la clasificación basada en sensores puede desempeñar un papel clave para asegurar un suministro de materia prima sostenible y asequible en el futuro (Henning Knapp et al., 2014).

Son estos aspectos que permiten considerar este tipo de tecnología como un beneficio para las actuales empresas mineras del país. Luego de clasificar un conjunto de tecnologías diferentes (según sus principios y mecanismos de trabajo) las cuales han sido aplicadas entre diferentes industrias mineras, se concluyó que entre los diferentes subprocesos presentados en el proceso de clasificación, la presentación de partículas y la separación de partículas parecen ser los procesos de mayor complejidad para las industrias mineras de cobre. Las principales causas de estas limitaciones surgen de la gran cantidad de material procesado por las industrias mineras de cobre versus la capacidad de procesamiento de la tecnología. En consecuencia, la instalación y modificación del plan minero parece ser una enorme barrera para lograr este tipo de mejora en un futuro próximo. Como resultado de este análisis, los autores de (Christopher Nikulin et al., 2016) proponen la tecnología NIR como un candidato inicial y como un primer paso en la automatización de la clasificación de mineral de cobre. Sin embargo, esta elección surgió de un enfoque de examen de partículas, que parece ser más factible en términos de recopilación de datos y análisis de datos, en comparación al resto de tecnologías nombradas. Además, la tecnología NIR no presenta limitaciones en términos de seguridad y protección humana, y tampoco en cuanto a regulaciones relacionadas, en comparación con otras tecnologías (por ejemplo, rayos X).

12.2.5 M_5: Contexto del estudio

¿Cuáles son, fueron y se espera que sea el STF y sus alternativas principales?

Para entender el contexto de este estudio, se dividirá según la recomendación de la Metodología FORMAT, a saber: pantalla múltiple del operador del sistema. La cual consiste en producir una descripción armonizada y holística del STF y sus alternativas. Formar una visión general de las alternativas tecnológicas identificadas como la evolución del pasado, a través del presente a una primera descripción de su futuro esperado.

Para comenzar se partirá por describir la principal función del sistema, la cual es: la clasificación de mineral basada en sensores es una herramienta diversa y flexible para separar partículas gruesas de acuerdo con una variedad de propiedades físicas y químicas.

Seguidamente, se describirá sucesivamente las "pantallas" del operador del sistema con una breve característica de los procesos de interés.

I. Súper-sistema

El súper-sistema se entenderá como el proceso minero cuprífero en general, desde que las rocas con mineral de cobre son extraídas desde los yacimientos, pasando por la planta de procesos, hasta convertir el producto final, que pueden ser cátodos de cobre refinado y/o mineral de cobre y sus concentrados.

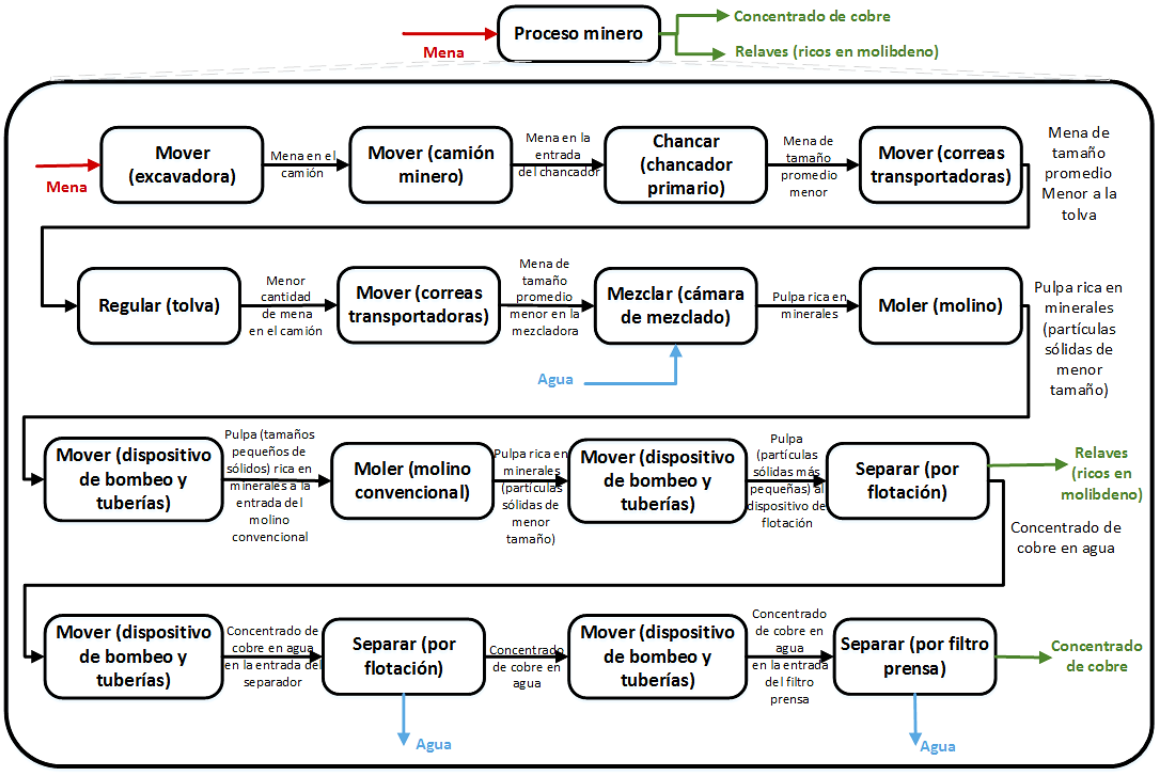


Figura 9: Descomposición funcional del proceso minero.
Fuente: (Christopher Nikulin et al., 2016)

II. Sistema

En el caso del sistema, éste se entenderá como la estructura del seleccionador y separador de mineral de cobre en tiempo real mediante la estimación de su ley de mineral promedio, el cual tendrá como fin de lograr un flujo de salida de rocas con una mayor ley de mineral que el flujo de entrada.

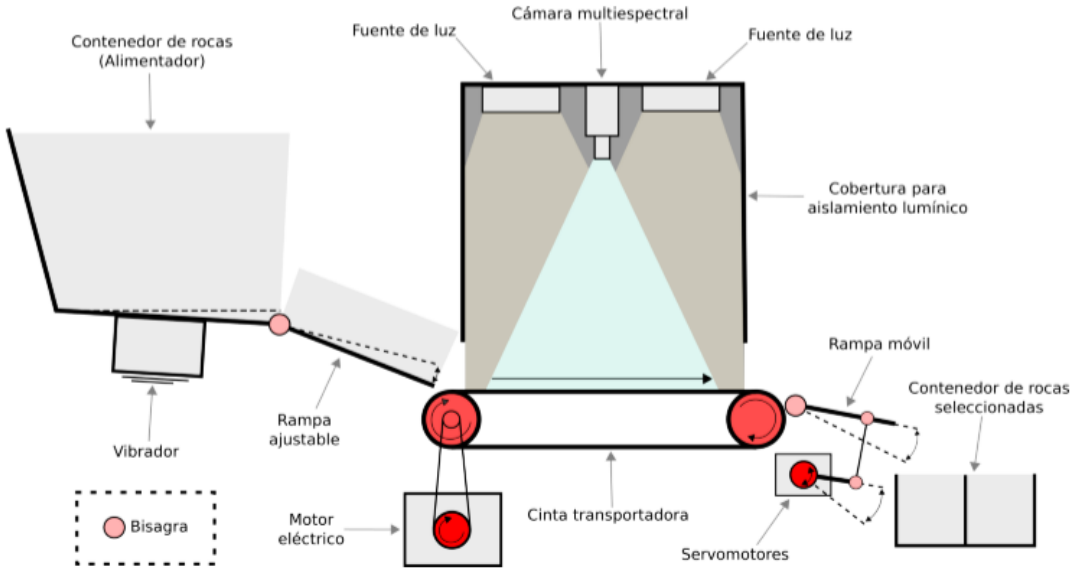


Figura 10: Diseño conceptual de un sistema de separación de minerales.
Fuente: (Eduardo Piñones Zuleta, 2016)

III. Sub-sistema

Finalmente el sub-sistema corresponderá a cada una de las partes que componen el sistema de separación de minerales, los cuáles se denotarán como módulos. A continuación se presentan los módulos funcionales, con sus respectivos componentes que permiten realizar una determinada función.

Módulo	Función	Posibles componentes
Alimentador	Recibir el material y desmontarlo para que se cree una capa homogénea.	Vibrador, Contenedor
Presentación	Generar un flujo de material, predecible y de velocidad constante, para poder analizarlo y luego separarlo.	Cinta transportadora, motor, poleas, correas
Detección	Capturar la información de las rocas que atraviesan el producto, ofreciendo confiabilidad en su análisis al crear un ambiente de iluminación controlada.	Cámara multiespectral (Infrarrojo cercano y luz visible), lámparas, cobertura
Procesamiento/ Control	Recibir la información de las rocas y analizarla para estimar la ley promedio de mineral de cobre que poseen, para luego enviar una señal a los separadores indicando que roca debe ser separada o continuar en su curso normal.	Computador, tarjeta de adquisición de datos, software de procesamiento
Separación de partículas	Recibir información de las rocas que deben ser separadas y modificar su trayectoria.	Servomotores, válvulas de aire
Contenedor	Recibir las rocas separadas en compartimentos distintos para verificar que se haya realizado con éxito el proceso	Madera, metal

Tabla 8: Definición de módulos funcionales y sus posibles componentes para el sistema de separación de minerales.
Fuente: (Eduardo Piñones Zuleta, 2016)

Pantalla múltiple

Esta etapa consiste en preparar una descripción estructurada del STF dentro del contexto de súper-sistemas, tomando en cuenta los cuatro dominios complementarios: tecnología, medio ambiente, economía y sociedad (TEES = *technology, environment, economics and society*). El objetivo de construir la pantalla múltiple es reconocer tendencias relevantes como un medio para identificar los factores que caracterizan la evolución del STF y las barreras que limitan dicha evolución.

		PASADO	PRESENTE	FUTURO
SÚPER SISTEMA	**TECNOLOGÍA**	Durante el período 1970-1990 la productividad laboral en Chile (medido en toneladas de cobre contenido en la producción minera por trabajador de la industria minera) ha tenido un aumento constante, seguido por aumentos de productividad de dos dígitos (22,3%) anualmente entre 1990 y 1997. Este último período se correlaciona directamente con dos factores principales: (1) un auge de la inversión minera extranjera resultante de nuevas operaciones de bajo costo y alto grado de clase mundial y (2) la implementación de la tecnología SX-EW (Extracción por solventes y electroerosión) en Chile, tanto en nuevas operaciones como en operaciones antiguas. (Bartos, 2007)	Desde hace algún tiempo que se observa una disminución en la inversión tecnológica minera en general, ya que las minas de metal no tienen control sobre los precios de los productos básicos, su filosofía predominante para sobrevivir es reducir los costos. Como resultado, la mayoría de las empresas de minería metálica domésticas han eliminado en gran medida la investigación y desarrollo y muchos son reacios a invertir en el desarrollo tecnológico para el que, según ellos, no hay necesidad inmediata. (National Research Council, 2002). Ahora pareciera ser que las empresas mineras se basan principalmente en el desarrollo tecnológico de sus proveedores (M. Sproul, Caterpillar representative, quoted in Yudelman, 2006),	Las posibilidades de nuevas tecnologías son ilimitadas, por lo que sería un error pensar que la tasa de producción disminuirá por falta de eficiencia en los procesos. La industria minera debe invertir en innovación tecnológica, ya que como se pudo observar tiempo atrás con la implementación de la tecnología SX-EW, los procesos productivos se vuelven más eficientes.

	MEDIO AMBIENTE	Chile tuvo pocas instituciones ambientales significativamente desarrolladas en los años de Pinochet. A partir de principios de los noventa, el país desarrolló un conjunto de leyes significativas pero limitadas. Existía una falta de aplicación y vigilancia de las leyes ambientales (Sustainable Development Strategies Group, 2010).	Pero las crecientes demandas de este sistema, sobre todo de la comunidad, la adhesión de Chile a la OCDE y otros factores están llevando a un dramático conjunto de cambios en la institucionalidad ambiental del país. CONAMA se está convirtiendo en un Ministerio de Medio Ambiente con mucho más poder. Las multas de mayor valor están aumentando drásticamente y parece haber una aplicación más estricta (Sustainable Development Strategies Group, 2010).	El país está discutiendo la creación de tribunales medioambientales especializados. Esto creará una barra más alta de desempeño ambiental para la industria minera chilena (Sustainable Development Strategies Group, 2010).
	ECONOMÍA	En 1960 se producían anualmente algo más de 500.000 toneladas de cobre (Patricio Meller, 2003).	El nivel de producción en el año 2015 en Chile fue de 5,7 millones de toneladas de cobre (líder en la participación de producción mundial de cobre) (Consejo Minero, 2016)	Chile tiene un potencial de alcanzar una capacidad máxima de producción cuprífera de 7,56 millones de toneladas de cobre para el año 2026.
	SOCIEDAD	A pesar del hecho de que la producción (física) del cobre aumentó nueve veces desde 1960 a 2000, las cifras muestran que el empleo en 1960 era similar al empleo existente en El año 2000 (alrededor de 30.000 puestos de trabajo) (Patricio Meller, 2003).	Al año 2015 en Chile, un 25% de las mineras disminuyó su dotación de trabajadores en más de un 10%; este proceso comenzó el año 2013 y ha sido llevado a cabo en forma continua por vías como no reemplazar a trabajadores voluntariamente retirados, planes de retiro voluntarios y finalmente, planes de retiro forzados (Consejo Minero, 2016).	Según proyecciones realizadas se estima que para el año 2024, el sector cuprífero chileno necesitará incorporar 30.000 personas. Aun cuando el sector está hoy viviendo una contracción fuerte en términos de capital humano, se espera que esta tendencia se revierta hacia el 2018 (Consejo Minero, 2016).

SISTEMA	TECNOLOGÍA	No existían clasificadores de mineral en la industria del cobre, simplemente se procesaba todo el material dentro de un rango de ley más amplio, mediante el análisis químico y/o geofísico de extracción parcial en sondajes.	Los proyectos de investigación actuales se centran en diferentes aspectos de la clasificación basada en sensores, como el desarrollo de sensores, el aumento del rendimiento, nuevos algoritmos de procesamiento de imágenes, como el reconocimiento de formas y patrones y el impacto económico de la clasificación por sensor en toda la cadena de proceso. Otro proyecto de investigación se refiere al modelado y predicción de los resultados de la clasificación, basado en el análisis del núcleo de perforación.	La conclusión general de la aplicación de la tecnología de clasificación por sensor en minería y la industria de procesamiento de minerales es que el potencial es alto, pero difícil de cuantificar, y debido a varias razones aún no se ha utilizado plenamente. (Christian Jönsson, 2014).
	MEDIO AMBIENTE	Se necesita menos energía (85%) para el reciclaje que para la producción primaria (la extracción del cobre) (http://procobre.org/es/)	El cobre es un material 100% reciclable, actualmente se reciclan aproximadamente 9 millones de toneladas de cobre por año (Consejo Minero, 2016).	A medida que pasa el tiempo, son más las regulaciones, directivas y guías internacionales que tratan de favorecer la gestión responsable del final del ciclo de vida de los productos que contienen cobre, como por ejemplo, electrodomésticos, teléfonos y vehículos.
	ECONOMÍA	En 1990, Chile producía 1,6 millones de toneladas de cobre, lo cual representaba un 18% de la producción anual mundial. Durante los años siguientes, Chile aumentó su producción considerablemente a una tasa de crecimiento anual compuesta de 9.2%, para alcanzar el 35% de la producción mundial en el 2004, aseveró Hernández (CEO de Antofagasta plc). Agregó que junto con el aumento de la producción, la productividad laboral se duplicó durante este periodo (http://procobre.org/es/).	A partir del 2004, sin embargo, la productividad comenzó a declinar. Ésta ha caído en un 43% desde el 2004 y esto se debe a la combinación de diferentes factores como la caída de las leyes y el aumento en la dotación. "Si bien las inversiones para aumentar la capacidad extractiva y de procesamiento han ayudado a compensar este efecto, esto no ha sido suficiente", dijo Hernández (CEO de Antofagasta plc). (http://www.aminerals.cl/, 2014).	Debido al declive en el nivel de producción es que la industria minera chilena tiene como gran desafío mejorar su productividad, mediante el fortalecimiento de la mano de obra, mejorar prácticas de trabajo e incorporar innovaciones tecnológicas (dentro de estas innovaciones estaría la incorporación de más automatización en las faenas mineras).

	SOCIEDAD	Hasta 1996 el ingreso de las mujeres a las faenas mineras estaba prohibido. (http://www.consejominero.cl/mujer-y-mineria/)	Con el pasar de los años, la industria minera ha buscado distintas alternativas para que más mujeres se integren a un mundo que por años fue relegado a los hombres. Sin embargo, según el estudio de Fuerza Laboral 2014-2023, actualmente la participación femenina en la minería sólo llega a un 7,5% (http://www.consejominero.cl/mujer-y-mineria/)	Se espera que la participación de la mujer aumente y que los mitos existentes en el mundo minero (antiguas creencias que decían que el género femenino traía mala suerte en los piques) se erradiquen por completo.
SUB SISTEMA	**TECNOLOGÍA**	Antiguamente la tecnología no estaba tan desarrollada en el ámbito de las cámaras multiespectrales, el primer paso en este campo se realizó en 1974 dentro del contexto de un contrato industrial sobre métodos exactos y rápidos para medir los colores impresos en el proceso de reproducción de una fábrica de impresión (Bernhard Hill, 2005).	Actualmente el componente más costoso del sistema de separación de minerales es la cámara multiespectral debido a que es un elemento altamente especializado, donde se busca una alta resolución y velocidad de adquisición de datos para el correcto funcionamiento (Bernhard Hill, 2005).	Se espera que para un futuro se logren los siguientes objetivos experimentales: reducir el tamaño del sistema de cámara, cámaras multiespectrales transportables, pantallas multiespectrales útiles para productos comerciales.
	MEDIO AMBIENTE	El Consumo de Energía ha tenido un constante crecimiento durante la última década, partiendo de un nivel de 31.728 [Gwh] en el año 1997, con un crecimiento de 82,94% el 2007 (INE Chile, 2008).	El consumo eléctrico de la minería se ha mantenido en 1/3 del total país (Consejo Minero, 2016).	La minería consume 120 US$ por MW/h; de no cambiar la situación actual, la minería chilena tendría la energía más cara entre los países mineros, solo superada por el Congo. (Consejo Minero, 2016).

	ECONOMÍA	Del proceso de extracción del cobre se pueden adicionar etapas para la obtención de diversos subproductos, como lo son el Oro, la Plata, el Molibdeno y el Renio (Alejandra Parra, 2011).	Muchos de los factores que determinan el nivel de costo de una compañía minera, corresponden a características del mineral extraído. Es por esto que se ha determinado que las características relevantes en los costos operacionales son la ley de mineral y el porcentaje de mineral primario, este último como indicador de la dureza (Alejandra Parra, 2011).	En un estudio realizado para determinar una función de costos operacionales para la producción de cobre se determinó 4 insumos principales junto a la importancia de sus costos: mano de obra 35% (22,6% directa, 12,3% indirecta), energía 20%, costos de capital 15% y otros insumos 30%. El análisis de los parámetros ajustados otorgó información respecto al comportamiento de los costos; por ejemplo, se estimó que la ley de extracción impacta significativamente: si ésta aumentara en un 10%, los costos asociados disminuirían un 3%. Se estimó además que las economías de escala disminuirán a medida que aumente el nivel de producción, hasta un nivel cercano a las 400 [KTon]. Pasado ese rango, los costos medios continuarían cayendo pero a una tasa bastante menor, mientras que para niveles superiores a 900 [KTon] se observarían deseconomías de escala. (Alejandra Parra, 2011).
	SOCIEDAD	Años atrás el riesgo para los trabajadores era mayor ya que la separación de minerales era realizada de forma manual mediante la identificación visual de los minerales en la superficie de rocas.	Las nuevas tecnologías digitales permiten alcanzar mayores niveles de integración y automatización de las operaciones de procesamiento y gestionarlas de forma remota y por ende, reducir el riesgo de los trabajadores mineros (http://www.wipo.int/portal/es/, 2015)	Mientras mayor sea el nivel de automatización en Chile, los operadores aprenderán a manejar las maquinas más rápido porque la mayoría de las funciones son ejecutadas automáticamente. Por otro lado, el riesgo laboral bajaría al mínimo al haber menos contacto directo con la maquinaria.

Tabla 9: pantalla múltiple

12.2.6 Compuerta M

Para continuar con la siguiente etapa del análisis, se debe verificar si se realizaron las siguientes actividades:

- ✓ Modelo de STF a nivel funcional (lógica similar a IDEF0) – hecho en el paso M_1
- ✓ Descripción de las tecnologías (soluciones) competitivas (alternativas) – hecho en el paso M_2
- ✓ Medida de rendimiento y gastos para STF y para las soluciones competitivas – hecho en el paso M_3

Descripción para STF:

- ✓ Contextos = super-sistemas (tecnológicos, económicos, ambientales, sociales) y subsistemas – hecho en el paso M_5
- ✓ Historia y futuro esperado – hecho en el paso M_5
- ✓ Actuales tendencias – hecho en el paso M_5

12.3 A

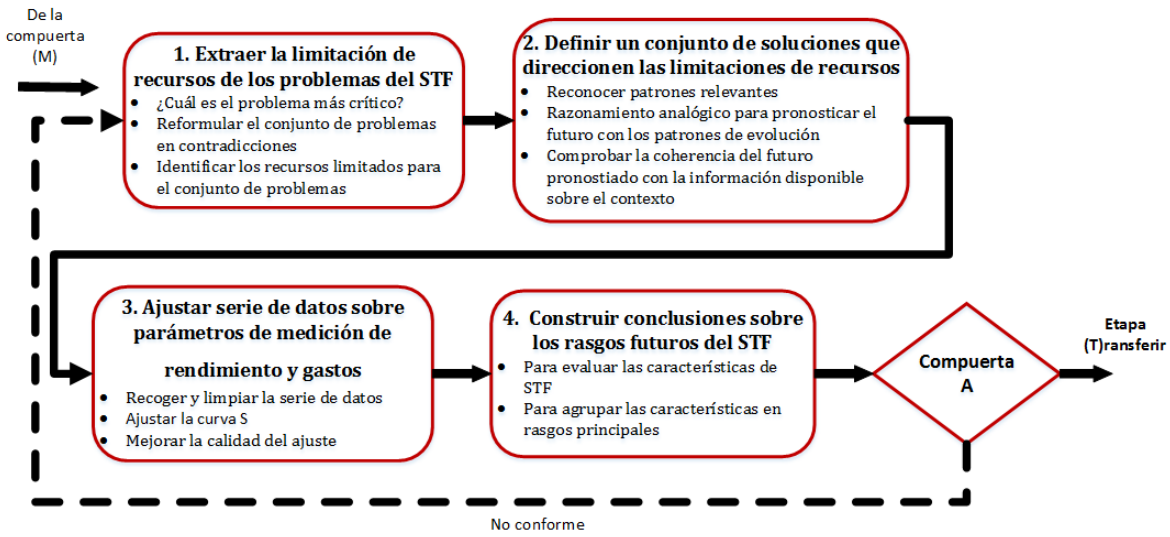


Figura 11: Diagrama de la etapa A y sus sub-etapas.

12.3.1 A_1: Identificar recursos limitantes

Extraer la limitación de recursos de los problemas del STF

Para comenzar el análisis de esta parte, se mostrará el diagrama IDEF0 del proceso de clasificación de las rocas del yacimiento minero, realizado en (Eduardo Piñones Zuleta, 2016). Dicha información ayudará a determinar cuáles son los problemas más críticos que afectan al STF junto a un conjunto de recursos limitados asociados a cada problema, ya que una limitación en la disponibilidad de un recurso crítico lleva a un problema de una necesidad no cumplida. La identificación y estudio de los recursos limitantes y su dinámica aclara los cambios futuros sobre el STF y sus contextos.

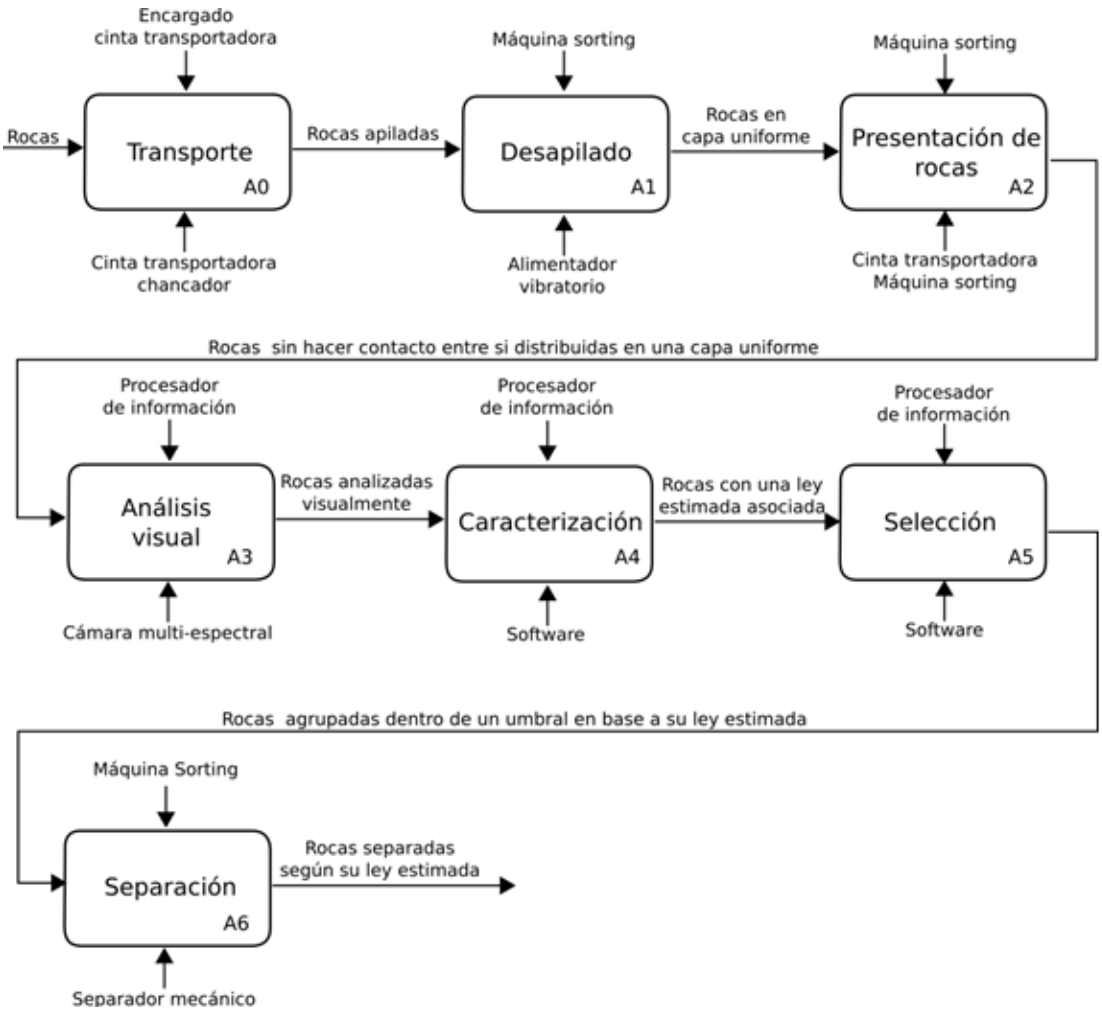


Figura 12: Diagrama IDEF0 del proceso de selección y separación de una roca.
Fuente: (Eduardo Piñones Zuleta, 2016).

A su vez se considerarán los problemas críticos identificados al estudiar las tecnologías alternativas, los que se enumeran en la siguiente tabla:

Problema	Descripción	Recursos limitantes	Unidades de medida
1	Se manejan grandes flujos de material en la industria del Cu	Capacidad de la nueva tecnología	[ton/h]
2	La ley de cada rocas debe ser similar	Precisión del sensor	Mediante muestras de rocas
3	Antes de pasar por el sensor de clasificación, las rocas deben estar en la cinta trasportadora pero sin hacer contacto entre sí, distribuidas en una capa uniforme.	Tiempo que tome disponer las piedras de forma correcta y espacio (ancho de la cinta transportadora)	[seg], [min]
4	La tecnología requiere de preparación y prueba	Tiempo que tome el desarrollo y adaptación de la nueva tecnología al contexto de la industria minera de cobre	[meses]
5	Costo de inversión alta	Dinero	[US$]

Tabla 10: Problemas críticos del STF.

12.3.2 A_2: Reconocer los patrones de evolución

Definir un conjunto de soluciones que direccionen las limitaciones de recursos

Los primeros acercamientos a la teoría de la espectroscopia de infrarrojo (IR) fueron realizados hace más de 200 años atrás (William Herschel, 1785), sin embargo, no fue hasta un siglo después, en 1930, cuando W. W. Coblentz construyó el primer espectrofotómetro de infrarrojos. Luego, la Segunda Guerra Mundial fue la encargada de expandir de la tecnología IR al utilizarla como herramienta analítica, especialmente para el análisis de productos del caucho y del petróleo, de modo que el primer espectrofotómetro de infrarrojos fue comercializado en 1940, lo que gatilló un crecimiento significativo en la espectroscopia de infrarrojo.

En los años posteriores, los clásicos espectrofotometristas trabajaron con bandas de absorción fundamental, las cuales se encontraban en su mayoría dentro del espectro de infrarrojo medio (2500 a 50000 [nm]). En esa época, los investigadores estaban convencidos de que los sobretonos y las bandas de absorción combinadas que ocurrían en el infrarrojo cercano (NIR) eran de poca importancia. No obstante, esta postura daría un giro, ya que el desarrollo de técnicas precisas de manufacturación para los detectores de luz, principalmente detectores de sulfuro, la disponibilidad de mejores suministros y la aparición de computadores de pequeño formato, revivieron el interés por la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) (Nuria Prieto Benavides, 2006).

Actualmente, la espectroscopia NIR es la técnica analítica que más se aplica a la quimiometría. La quimiometría es el uso de técnicas matemáticas y estadísticas para extraer información relevante de los datos analíticos, en este caso, los datos espectrales NIR. Tanto la quimiometría como la tecnología NIR han evolucionado en una simbiosis donde la espectroscopia NIR logra modelos de identificación y cuantificación más robustos y extiende su aplicabilidad, planteando nuevos desafíos a la quimiometría que motiva la mejora de muchas de sus técnicas (Celio Pasquini, 2003).

No es sorprendente, en vista de la información casi universal que lleva un espectro NIR, que la tecnología NIR ha encontrado un amplio campo de aplicación. La lista a continuación enumera algunos de los sectores en los que la tecnología NIR ha tenido éxito con fines cualitativos y cuantitativos. El atractivo principal de la técnica, su carácter directo y no invasivo, ha sido el motor de su aplicación en la agricultura y en el análisis de procesos. Por lo tanto, un método analítico basado en la espectroscopia NIR ofrece la respuesta rápida requerida para aplicaciones en línea e intensivas e incluso para aplicaciones de "control de calidad del 100%".

Sectores en los que se ha aplicado la tecnología NIR:

1. Agrícola / alimentario
    - 1.1 Productos agrícolas
    - 1.2 Productos de comida industrial
    - 1.3 Agricultura de precisión / Suelo
2. Polímero
    - 2.1 Procesamiento de polímero
    - 2.2 Características de la calidad del polímero
3. Industria del Petróleo y del Combustible
    - 3.1 Control de calidad del combustible
    - 3.2 Proceso de producción de combustible
    - 3.3 Caracterización del petróleo
4. Ambiental
5. Textiles
6. Biomédico / Clínico
7. Farmacia y Cosmética
8. NIR - imagen

El área agrícola fue la primera en hacer un uso intensivo de la espectroscopia NIR. De hecho, esta área fue responsable del lanzamiento de la tecnología en el mercado y de iniciar su desarrollo hasta el nivel que ha alcanzado en este último periodo. El uso más reciente de la tecnología NIR en este sector ha sido el apoyo a la agricultura de precisión. La posibilidad de utilizar instrumentos NIR en el campo de cultivo, la recolección de datos en tiempo real y su correlación con la composición del suelo es esencial para producir los datos refinados necesarios para la agricultura de precisión. Después de las aplicaciones agrícolas, muchas otras áreas están experimentando un uso intensivo de la tecnología NIR. Las industrias farmacéutica y petroquímica (incluyendo el segmento de polímero) son las áreas donde la espectroscopía infrarroja NIR ha encontrado recientemente gran aplicabilidad (Celio Pasquini, 2003).

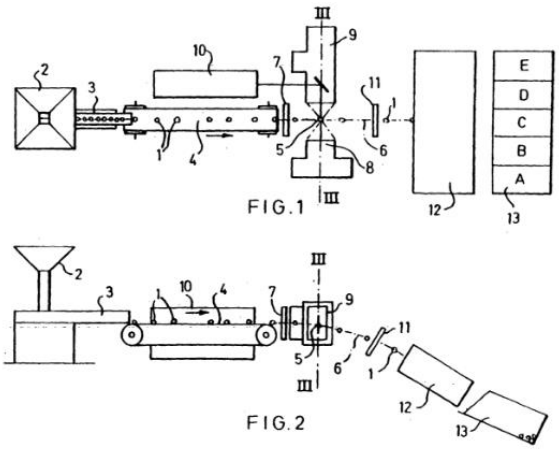
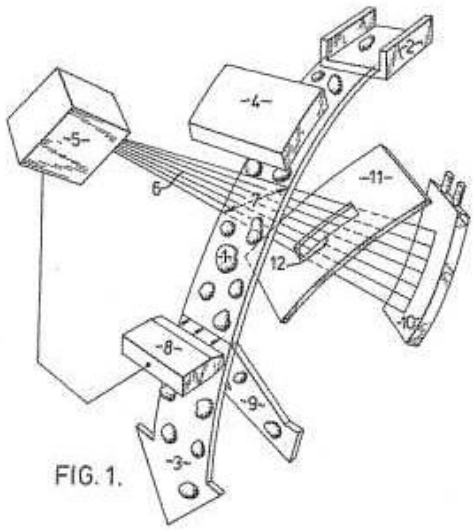
La imagen NIR, la tomografía óptica clínica y el análisis bioquímico no invasivo in vivo son campos en los que también se han centrado muchos esfuerzos de investigación en los últimos años, mostrando resultados prometedores (Celio Pasquini, 2003). Más actual es la incursión de la tecnología NIR en la industria minera, específicamente en la clasificación de minerales, donde la multinacional noruega Tomra Systems ASA es un exponente importante en esta área, empresa la cual se desarrolla en el campo de la instrumentación para soluciones de reciclaje. El inconveniente hasta el momento, es que esta empresa no la ha utilizado para el cobre en particular, sino para otros minerales como el diamante.

Teniendo noción de lo beneficioso que podría ser este tipo de tecnología en la industria cuprífera, ¿por qué la clasificación de mineral recién ahora atrae más atención? La respuesta se reduce a la velocidad.

En los inicios de su descubrimiento y desarrollo en 1970 el principal inconveniente de la clasificación basada en sensores era la velocidad de procesamiento. Los sistemas de primera generación simplemente no eran económicamente factibles para la mayoría de las aplicaciones mineras. Hoy en día, sin embargo, la fiabilidad y la velocidad del procesamiento informático han eliminado esa barrera. Las técnicas de formación de imágenes y ensayo han mejorado, proporcionando así un mayor rendimiento y mediciones de densidad más precisas lo que han permitido el procesamiento de partículas más pequeñas.

Más allá de sus beneficios financieros, la clasificación por sensor también ofrece una ventaja ambiental. En primer lugar, es un proceso completamente seco y libre de químicos. En segundo lugar, reduce la cantidad de relaves procesados, lo que requiere instalaciones más pequeñas de contención de relaves y tratamiento. Se espera que las ventas de máquinas basadas en sensores crezcan en torno a un 15% anual, sin embargo, señalan que el crecimiento dependerá de nuevas aplicaciones y el desarrollo de nuevas tecnologías. Por otro lado se debe considerar que a medida que el agua y la energía se hacen cada vez más escasas, los precios aumentarán debido a la competencia entre la industria minera y otros usuarios (Canadian Mining Journal, 2015).

Para complementar el estudio de la identificación de la dirección del desarrollo tecnológico, se realizó un análisis de patentes el cual permite hacer un benchmarking con la competencia existente y así clarificar los avances de la tecnología hasta el momento. Es importante realizar un análisis de patentes en el ámbito tecnológico y científico ya que esta área se está desarrollando de forma exponencial con niveles crecientes de especialización, por lo que es más difícil dominar todos los aspectos necesarios (Niccolò Becattini, 2014). Además, cabe destacar que se ha estimado que las patentes contienen una gran cantidad de información no disponible en otro lugar, casi el 80% del contenido total (M. Bregonje, (2015).

Patente	Imagen
Classifying or sorting **CA 2104470 C**	Imagen no disponible
Procedure and equipment for classifying or sorting of minerals **EP 0772037 B1**	
Sorting apparatus **GB2057123 A**	

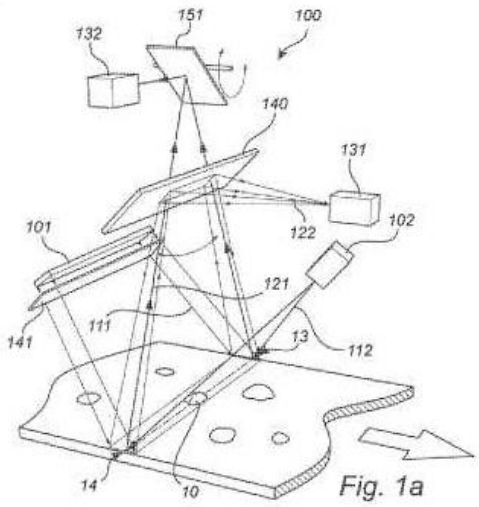
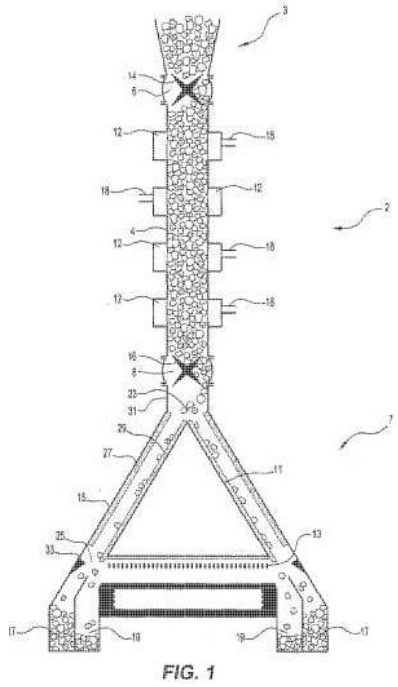
Inspection apparatus **US 20160252461 A1**	
Processing mined material **MX2014001261 A**	

Tabla 11: Análisis de patentes sobre tecnologías de separación de minerales, específicamente del cobre.

El resultado arrojó un número muy acotado de tecnologías de clasificación en base a la espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR) y en cuyas descripciones no especifica la aplicación

de cobre sino más bien se define al objeto en estudio como: cualquier cuerpo que sea adecuado para la inspección óptica, tales como (pero sin limitarse) minerales y alimentos, así como desperdicios y desechos recogidos. Por otro lado, sólo una patente (Inspection apparatus) detalla en su descripción que incluye un mecanismo de expulsión para separar físicamente los objetos entre los de interés y los que son considerados como desecho. Un punto a favor del proyecto de instaurar una maquinaria de este tipo en una planta minera de cobre es que se trata de una tecnología que ya ha sido desarrollada, lo que permite concluir que esta técnica es una solución real y que apoyará en el proceso de determinar la ley de las rocas.

Aún con lo beneficioso que se muestra esta tecnología, por el momento, y sobre todo en Chile, la clasificación basada en sensores sigue siendo una tecnología que aún no ha sido plenamente aceptada por la industria minera, pero la necesidad de enfoques más eficaces desde el punto de vista financiero debería seguir prestando más atención en el futuro debido a los beneficios económicos (Canadian Mining Journal, 2015).

12.3.3 A_3: Ajustar series de tiempo

Ajustar serie de datos sobre parámetros de medición de rendimiento y gastos

El objetivo de este paso es identificar, mediante un análisis cuantitativo de las tendencias, cómo han evolucionado los parámetros relacionados con la tecnología en los últimos años. Para esto se pronosticará, por extrapolación de tendencias cuantitativas, cómo la tecnología (y el sistema en el que se desarrollará) va a continuar su evolución en los próximos años.

Los parámetros considerados relevantes en este estudio son: costos de la minería del cobre en Chile, precio de venta del cobre, Consumo de energía eléctrica de la minería del cobre en Chile y por último ley de mineral de cobre en Chile.

El programa utilizado en esta etapa fue Minitab 17.

Precio de venta del cobre

El precio de venta del cobre, al cual se transa en el mercado, es de vital importancia a la hora de decidir invertir en esta industria ya que si su valor es más bajo o similar al costo de producción, el proyecto no es rentable; incluso, para un escenario más crítico podría significar el cierre de faena.

Los datos recopilados corresponden a la base de datos del Banco Central de Chile, los cuales consisten en el precio del cobre refinado BML (bolsa de metales de Londres) en dólares por libra de cada mes.

Tras realizar una serie de regresiones (y utilizando un nivel de confianza del 5%), se decidió que la curva que mejor define el comportamiento del precio del metal rojo es la cuadrática. La gráfica de la regresión se presenta a continuación:

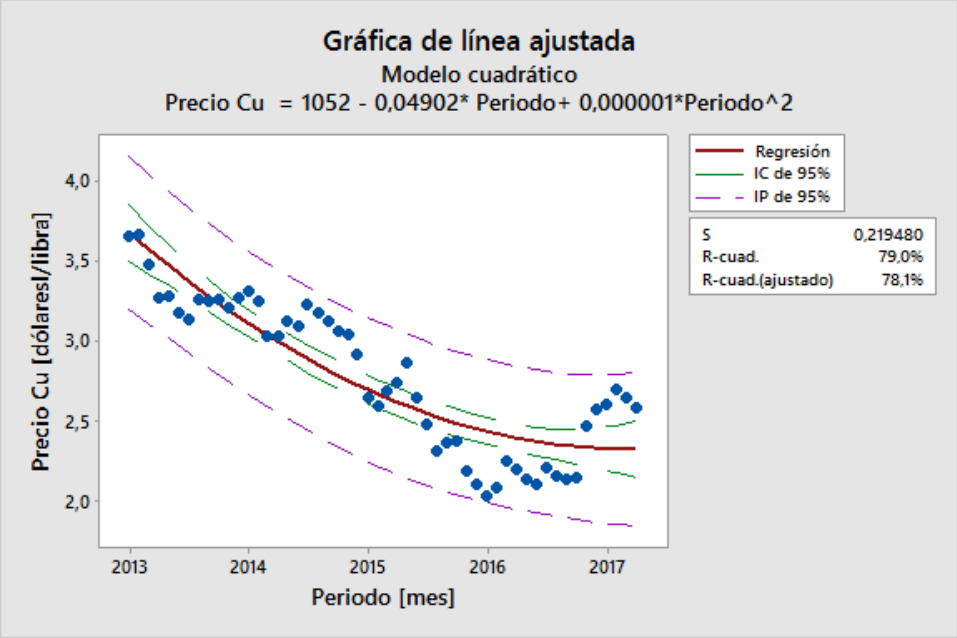


Figura 13: Gráfica de regresión para el precio del cobre refinado [US$/lb].

Con el objetivo de verificar el modelo de regresión ofrecido por el programa Minitab 17, se analiza la tabla de coeficientes:

Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p
Constante	1052	288	3,65	0,001
Periodo [mes]	-0,049	0,0137	-3,57	0,001
Periodo [mes]* Periodo [mes]	0,000001	0,0000	3,51	0,001

Tabla 12: Análisis de coeficientes para regresión cuadrática del precio del cobre refinado..

Como se observa en la tabla anterior, el valor-p para cada coeficiente es menor al valor de significancia (0,05), esto quiere decir que el modelo asegura que la relación entre el precio del cobre refinado y el periodo es estadísticamente significativa.

Respecto a los supuestos que se deben cumplir en el modelo, se procede a analizar los resultados arrojados de los residuos estandarizados:

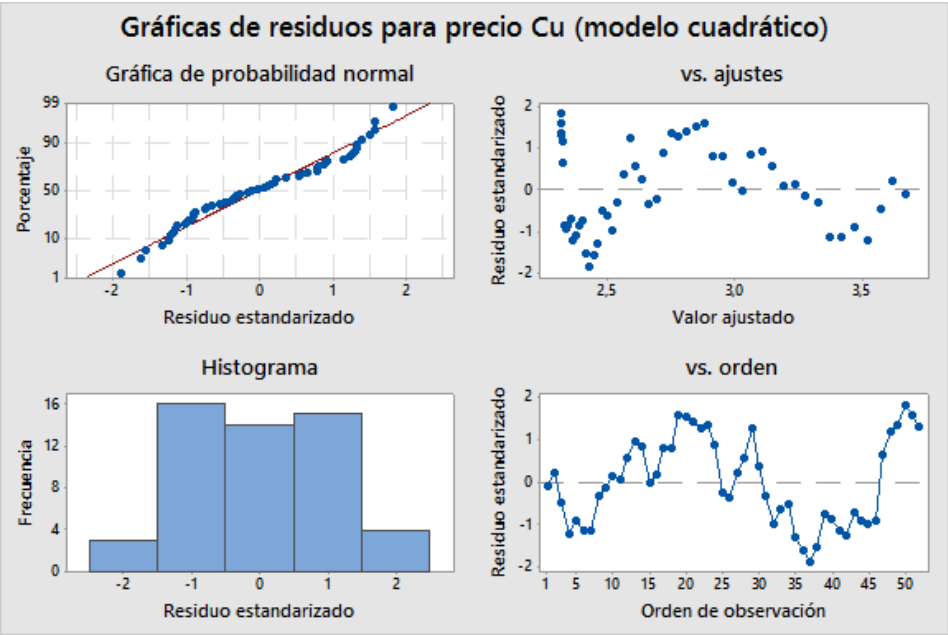


Figura 14: Gráfica de residuos estandarizados para la regresión cuadrática del precio del cobre refinado.

Se puede observar en la gráfica de residuos estandarizados versus orden de observación que no existe ningún dato influyente; por otro lado, el gráfico de residuos estandarizados versus valor ajustado evidencia la existencia de homocedasticidad de las varianzas. Por último, es comportamiento de los residuos, el cual se puede observar en los gráficos de la columna derecha, poseen una distribución normal.

Tras corroborar el modelo de regresión, se procede a pronosticar los valores para los siguientes 12 meses.

Periodo [mes]	**Ajuste [US$/lb]**	**IP del 95% [US$/lb]**	
		LI	LS
may-17	2,320	1,840	2,801
jun-17	2,322	1,836	2,809
jul-17	2,325	1,832	2,819
ago-17	2,330	1,828	2,831
sept-17	2,335	1,825	2,844
oct-17	2,341	1,822	2,860
nov-17	2,349	1,820	2,877
dic-17	2,357	1,817	2,896
ene-18	2,366	1,815	2,918
feb-18	2,377	1,813	2,942
mar-18	2,388	1,811	2,965
abr-18	2,401	1,809	2,992
may-18	2,414	1,808	3,021

Tabla 13: Pronósticos para el precio del cobre refinado [US$/lb].

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores del precio del cobre irán en aumento, el porcentaje será pequeño pero positivo. Dicha tendencia es avalada por expertos de la industria, donde se nota un claro positivismo al señalar que este movimiento obedece a las mejores expectativas de demanda del metal por parte de China (actualmente China representa el mayor mercado de ventas del cobre chileno), "…Tiene que ver con las perspectivas. En el momento más bajo del precio, la expectativa sobre el consumo de China era negativa. Ahora hay una nueva expectativa de que la demanda de China va a subir. Si hace cinco meses se pensaba que China elevaría su consumo entre 2% y 3%, ahora se prevé que será en torno a 3% y 4% este año…" señaló (Diego Hernández, presidente de Sonami, 2016).

Costos en la minería del cobre en Chile

La base de datos fue extraída del documento (Consejo Minero, 2017), comprendida desde el año 2003 hasta el 2015* (el último dato fue una estimación). Los costos de la minería fueron considerados como: *Cash costs* + Depreciación + Intereses + Costos indirectos.

Cash costs: Los *cash costs* son todos aquellos costos que se incurren en efectivo, cuando la producción se está llevando a cabo, menos los ingresos por la venta de subproductos.

A continuación se presenta la regresión que mejor describe el comportamiento de los costos de producción del cobre, con una confianza del 95%:

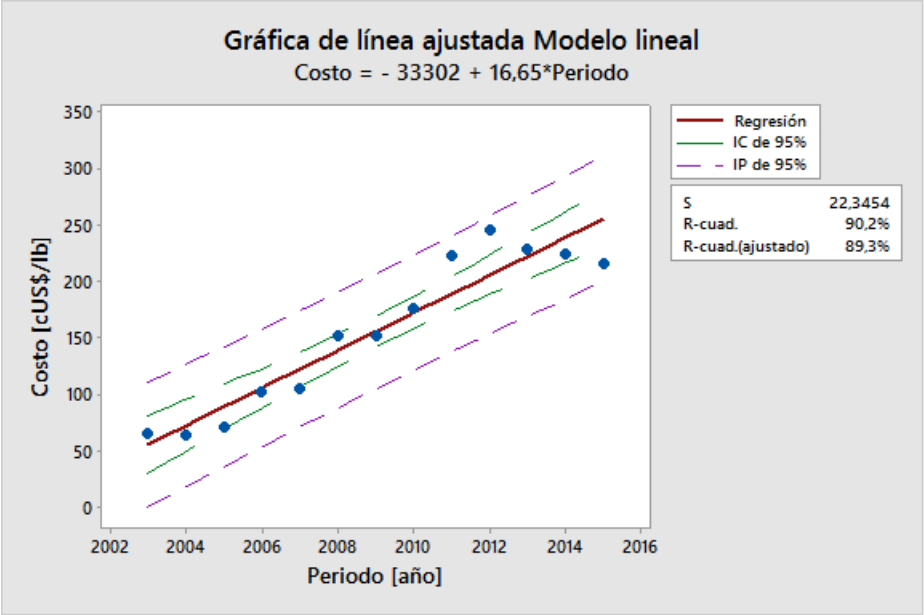


Figura 15: Gráfica de regresión para el costo en la minería del cobre en Chile [cUS$/lb].

Antes de examinar el modelo de regresión, se realizarán unas observaciones de los datos desde el año 2013 hasta el 2015: al observar los valores reales se puede apreciar que, si bien los costos aumentan hasta alcanzar el punto más alto en el año 2012, éstos comienzan a desacelerar a partir del 2008, efecto que se debe en parte a la caída del precio del diésel en esos años, a las mejoras en eficiencia en procesos ya existentes y a la incorporación de tecnologías más económicas (ERNC) (Jorge Cantallopts, 2016). A partir del año 2012 los costos han

disminuido derechamente, la principal razón: "Estamos viendo que los costos de producción están disminuyendo por la baja demanda que hay en el sector minero. Hay menos proyectos y hay menos demanda y eso hace que el valor de los servicios esté bajando", señaló el vicepresidente senior de Pascua Lama, Eduardo Flores a Portal Minero (Portal Minero, 2014).

Continuando con el estudio, una vez identificada la regresión, el programa utilizado arroja la siguiente tabla de coeficientes:

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p
Constante	-33302	3328	-10,01	0
Periodo [año]	16,65	1,66	10,05	0

Tabla 14: Análisis de coeficientes para la regresión lineal del costo en la minería del cobre en Chile.

El valor-p en ambos casos es igual a cero por lo que la relación entre el costo en la minería del cobre y el periodo es estadísticamente significativa (recordar que se escogió un nivel de significancia del 5%).

Para el estudio de los residuos estandarizados, los gráficos proporcionados por el programa Minitab 17 son los siguientes:

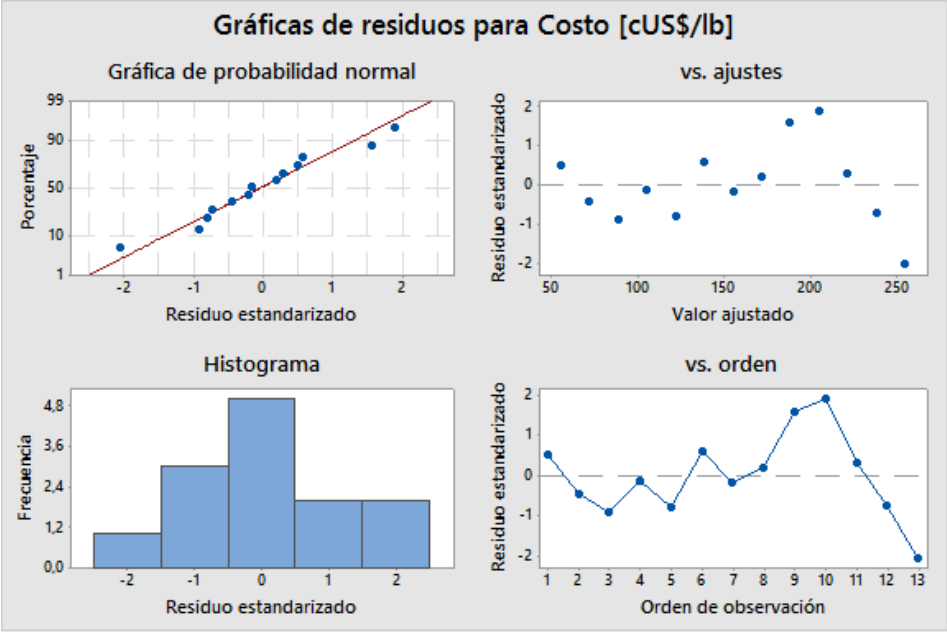


Figura 16 : Gráfica de residuos estandarizados para la regresión lineal del costo en la minería del cobre en Chile.

Como se puede apreciar en el gráfico de residuos estandarizados versus orden de observación (esquina inferior derecha) existe un dato influyente (observación número 13), ya que el valor del residuo estandarizado es menor a -2; si bien el R^2 ajustado del modelo no es un valor bajo (83,9%), quitar este dato atípico del análisis aumentaría el coeficiente de

determinación. Por otro lado, al observar el gráfico de residuos estandarizados versus valor ajustado (esquina superior derecha) se puede deducir que existe homocedasticidad. Finalmente el estudio de normalidad (gráficos de la columna izquierda) arroja un comportamiento normal de los residuos.

Siguiendo con el estudio, se procede a determinar los pronósticos para los siguientes años:

Periodo [año]	**Ajuste [cUS$/lb]**	**IP del 95%**	
		LI	LS
2016	271,81	214,74	328,87
2017	288,46	229,68	347,25
2018	305,12	244,44	365,79
2019	321,77	259,05	384,49
2020	338,42	273,51	403,33
2021	355,08	287,86	422,30
2022	371,73	302,08	441,38
2023	388,38	316,21	460,56
2024	405,04	330,24	479,84
2025	421,69	344,19	499,20

Tabla 15: Pronósticos para el costo de la minería del cobre en Chile.

Los pronóstico evidencian un alza en los costos de producción, lo que podría deberse principalmente a la crisis energética debido a que Chile posee exiguas reservas de petróleo y gas natural, siendo precisamente este tipo de materiales energéticos los más utilizados en la industria. Una gran parte de nuestra matriz energética se basa principalmente en materiales fósiles importados, lo que incide tanto en los costos de vida de los habitantes del país como en los procedimientos industriales. El hecho de depender de proveedores de este tipo de fuentes energéticas implica una dificultad a la hora de bajar dichos costos, por lo que resulta fundamental estudiar nuevas posibilidades energéticas (Valentina De Giorgis Paris, 2016).

Este aspecto tan importante y crítico en la minería impulsa el desarrollo de nuevos proyectos que puedan revertir la situación, no necesariamente desarrollados en el área energética sino de distintas índoles, como lo sería la clasificación de minerales basada en sensores de visión, ya que al clasificar el material de alta ley del material estéril, sólo se procesará el material de interés y por ende no se incurrirá en costos tratando de procesar material que no es interés para la empresa.

Consumo de energía eléctrica de la minería del cobre en Chile

Tras nombrar el tema de la crisis energética (y en particular la energía eléctrica) en el futuro de la minería, se hace necesario analizar en detalle este punto, que para el año 2015 correspondió al 10% del gasto operacional total de la industria del cobre (Consejo Minero, 2017) y que según explicó la ministra de Minería, Aurora Williams en el año 2016 "se prevé que a futuro tenga una incidencia mayor".

A continuación se presenta la gráfica con el modelo de regresión que mejor se ajusta al comportamiento del consumo de energía eléctrica:

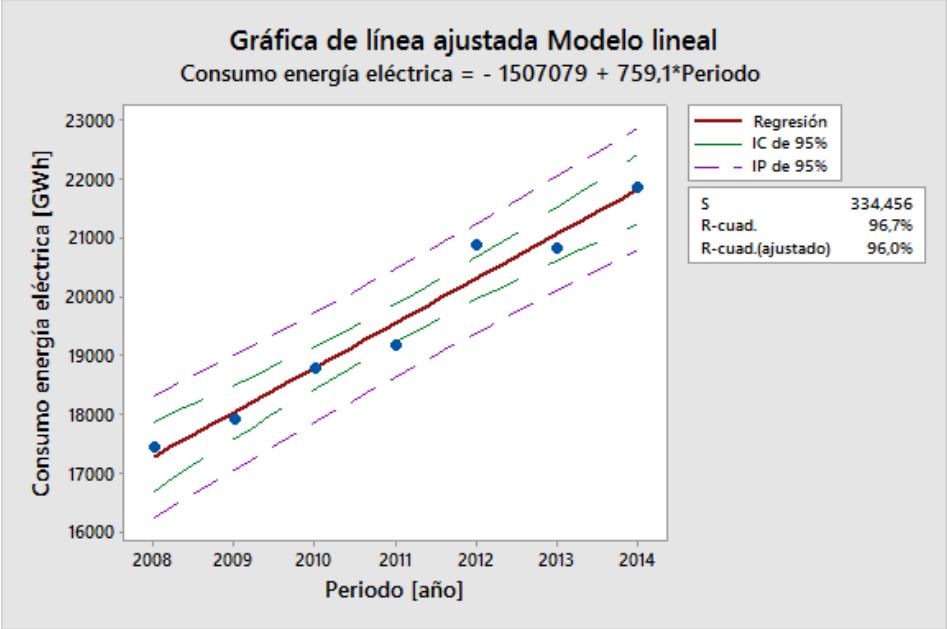


Figura 17: Gráfica de regresión para el consumo de energía eléctrica en [GWh] en la minería de cobre.

Al igual que los casos anteriores, se escogió un nivel de significancia del 95%, cuya tabla de coeficientes es la siguiente:

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p
Constante	-1507079	127108	-11,86	0,00
Periodo [año]	759,1	63,2	12,01	0,00

Tabla 16: Análisis de coeficientes para la regresión lineal del consumo de energía eléctrica.

El valor-p para cada coeficiente es menor a 0,05 por lo que la relación entre el consumo de energía eléctrica y el periodo es estadísticamente significativa.

En cuanto al análisis de los residuos estandarizados, los resultados arrojados fueron los siguientes:

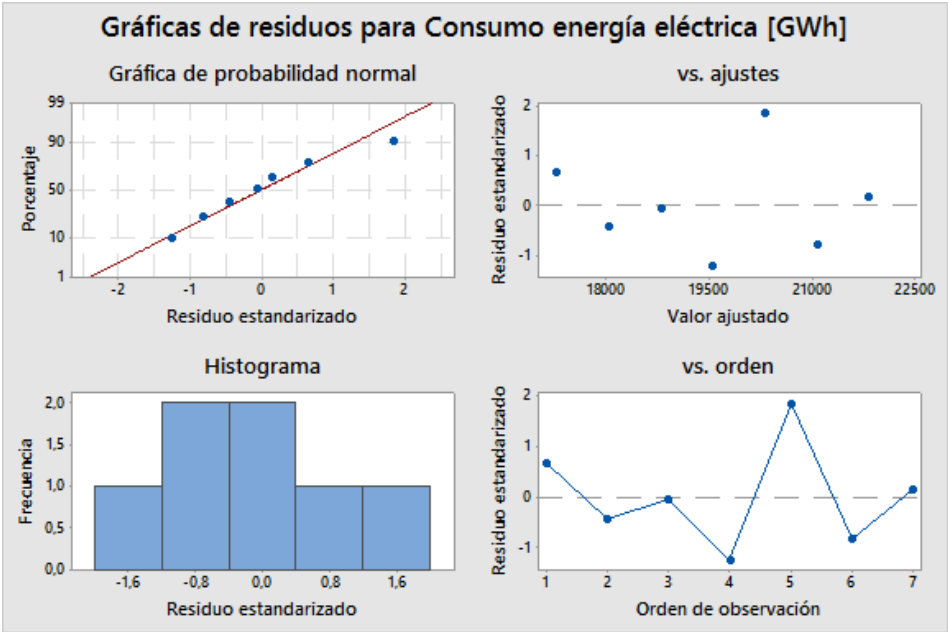


Figura 18: Gráfica de residuos estandarizados para la regresión lineal del consumo de energía eléctrica.

Según el gráfico de residuos estandarizados versus valor ajustado se está en presencia de homocedasticidad. En cuanto a puntos influyentes, el gráfico de residuos estandarizados versus orden permite descartar su existencia. Por último, los gráficos de la columna izquierda evidencian un comportamiento normal de los residuos.

Tras corroborar la regresión de los datos correspondientes, se pronostican los valores del consumo de energía eléctrica para los siguientes 10 años, los resultados fueron los siguientes:

Periodo [año]	**Ajuste [GWh]**	**IP del 95%**	
		LI	LS
2015	22593,6	21467,9	23719,2
2016	23352,7	22126,0	24579,4
2017	24111,9	22772,0	25451,7
2018	24871,0	23408,7	26333,3
2019	25630,1	24038,2	27222,1
2020	26389,3	24662,1	28116,4
2021	27148,4	25281,7	29015,1
2022	27907,6	25897,8	29917,3
2023	28666,7	26511,2	30822,2
2024	29425,9	27122,4	31729,4

Tabla 17: Pronósticos para el consumo de energía eléctrica.

Como se puede apreciar en la tabla 17 la tendencia será al alza, el consumo de energía eléctrica en la industria minera será cada vez mayor. Sergio Hernández, vicepresidente

ejecutivo de Cochilco, pronosticó que las compañías mineras demandarán más electricidad debido a una serie de factores estructurales que enfrenta el sector, tales como el envejecimiento de las minas, la tendencia a un incremento en la dureza del mineral y la caída de las leyes del mismo…"Esto significa que las empresas tienen que extraer grandes y crecientes volúmenes de mineral para lograr mantener los niveles de producción de cobre fino año a año, lo que conlleva a un incremento en el uso de energía en procesos como chancado y molienda", señaló (Minería Chilena, 2016).

La aplicación del proyecto de clasificación de minerales ayudaría a aminorar el consumo de energía ya que se procesaría menos material, aunque esto no implicará obtener la misma cantidad de producción debido a los factores estructurales ya nombrados.

Ley del mineral de cobre en Chile

La ley de una especie mineralógica pura es la proporción que tiene un determinado elemento (en este caso el cobre) respecto del total de elementos que contiene la especie. Esta proporción se obtiene a partir de los "pesos atómicos" de cada elemento.

Es esta característica del mineral a procesar en la que se fundamenta el proyecto de clasificación en base a sensores, y por lo mismo es importante analizar cuál será su tendencia. Al consultar la base de datos que maneja (Cochilco, 2016) la regresión que mejor se ajusta su comportamiento de la ley del mineral, es el siguiente:

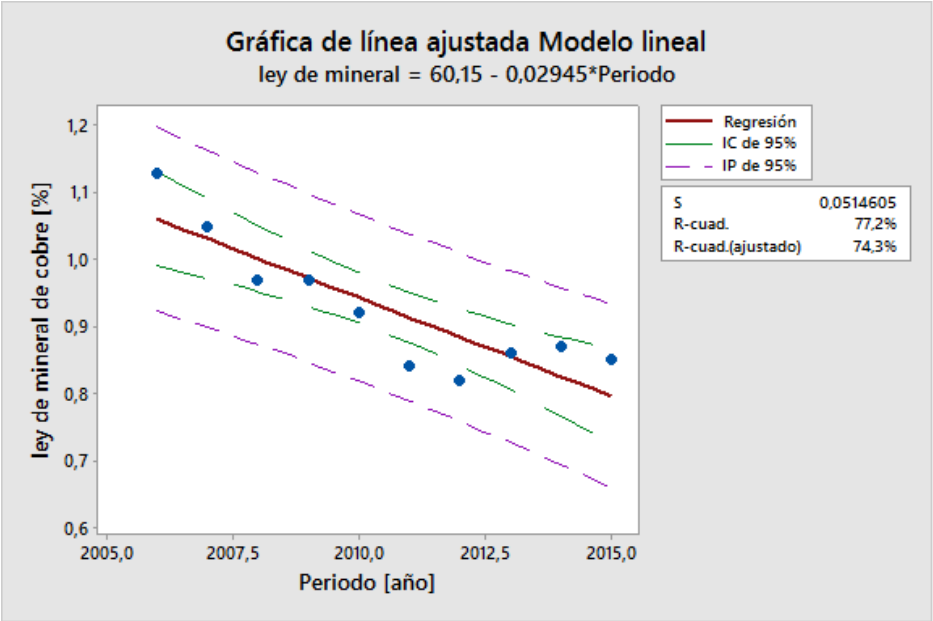


Figura 19: Gráfica de regresión para la ley de mineral de cobre en Chile [%].

Para ratificar el modelo de regresión y con un nivel de confianza del 95%, el programa entrega la siguiente tabla de los coeficientes:

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p
Constante	60,1	11,4	5,28	0,001
Periodo [año]	-0,02945	0,00567	-5,2	0,001

Tabla 18: Análisis de coeficientes para regresión lineal de la ley de mineral de cobre en Chile.

Efectivamente la relación entre el porcentaje de ley de mineral de cobre y el periodo es estadísticamente significativa debido a que como se puede observar en la tabla anterior el valor-p para cada coeficiente es menor a 0,05.

Continuando con la verificación de la regresión, se procede a analizar los residuos estandarizados, cuyos gráficos son los siguientes:

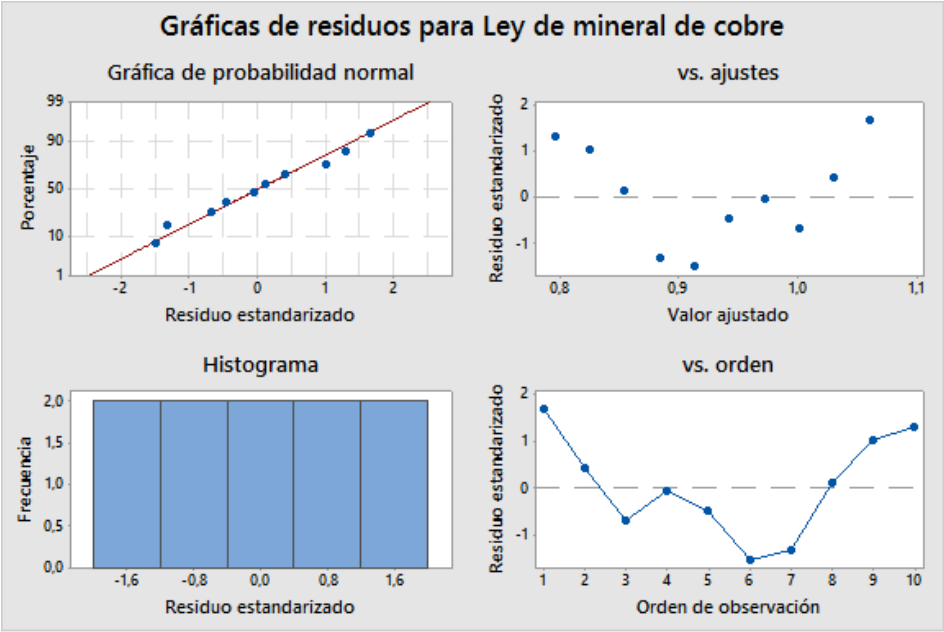


Figura 20: Gráfica de residuos estandarizados para la regresión lineal del porcentaje de ley de mineral de cobre en Chile.

En este conjunto de datos no existen puntos influyentes, como se puede observar en el gráfico de residuos estandarizados versus orden de observación. También se puede deducir gracias al gráfico de residuos estandarizados versus valor ajustado que el modelo presenta homocedasticidad. Finalmente en cuanto a normalidad de los residuos, los gráficos de la columna derecha avalan la hipótesis de normalidad.

Tras corroborar la regresión de los datos correspondientes, se procede a pronosticar los valores para los siguientes 10 años, los resultados fueron los siguientes:

Periodo [año]	Ajuste [%]	IP del 95%	
		LI	LS
2016	0,766	0,622	0,910
2017	0,737	0,586	0,887
2018	0,707	0,549	0,865
2019	0,678	0,511	0,844
2020	0,648	0,472	0,824
2021	0,619	0,433	0,804
2022	0,589	0,394	0,784
2023	0,560	0,354	0,765
2024	0,530	0,314	0,746

Tabla 19: Pronósticos para el porcentaje de ley de mineral de cobre en Chile.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la tendencia de la ley será a la baja, en otras palabras, la concentración de cobre en los yacimientos será cada vez menor, esto debido a la cantidad de material que ha sido extraído de dichos yacimientos a lo largo de los años.

El problema de poseer una ley más baja es que disminuye la competitividad de la industria chilena en comparación con el mercado internacional. Según Joaquín Villarino, presidente ejecutivo del Consejo Minero (Miguel Concha M., 2012), desde 1992 a la fecha las leyes del metal rojo disminuyeron en 46%, pasando de 1,61% a 0,87%. Esta cifra se compara desfavorablemente con la reducción de 23% que anotó el indicador en el resto del mundo, tras pasar de 1,45% a 1,12%. "La ley promedio de cobre extraído en Chile fue históricamente alta en comparación al resto del mundo (...) Si bien en todos los países las leyes han ido bajando, dado que primero se explotan los yacimientos y bloques de mayor concentración de mineral, en Chile el descenso ha sido más brusco", señaló Villarino.

A pesar que este parámetro corresponde a una característica intrínseca del yacimiento y por ende, no existe posibilidad de revertirlo, al menos el proyecto de clasificación basado en sensores podrá mitigar, en parte, los costos extras que implicarían producir la misma cantidad de producto final, pero con una ley cada vez menor.

A modo de conclusión, la aplicación del proyecto de clasificación de minerales basado en sensores de visión en la industria del cobre, generaría un efecto dominó entre los parámetros estudiados en este paso (A_3). Al separar las rocas, que provienen directamente del yacimiento, en dos categorías: mineral de alta ley y material estéril, permitirá que sólo el material de interés pase a la planta de procesamiento y por ende, al tratar un flujo menor, la energía necesaria para convertirlo en producto final será menor y como consecuencia los costos disminuirán; lo anterior sumado a un precio del cobre mayor facultará a la industria de generar utilidades mayores.

12.3.4 A_4: Definir rasgos futuros

Construir conclusiones sobre los rasgos futuros del STF

El objetivo de este paso consiste en integrar los resultados de las actividades anteriores, comprobar su consistencia e identificar las principales características (rasgos) del STF para el horizonte temporal definido en una ubicación determinada. Format recomienda dividir estas características en tres categorías, las cuales son: (1) las características futuras del super-sistema; (2) las características futuras del STF; (3) características identificadas del subsistema.

(1) Características futuras del súper-sistema

- Nivel de productividad: dada la caída en el precio del cobre, el consiguiente fin de la bonanza, y la caída en las leyes, la única forma de que el cobre siga realizando su aporte al desarrollo nacional es elevando su productividad, y por ende, reduciendo sus costos unitarios. Esto está inevitablemente vinculado a un mayor rol del cobre en innovación (Comisión Nacional de Productividad, 2016)

- Innovación: El número de tecnologías revolucionarias desarrolladas en diversos sectores de la industria minera durante el último siglo equivale a una tasa de uno a tres por siglo; una tasa comparable a otras industrias "maduras" como el cemento y la fabricación de vidrio. Por el contrario, el sector de la microcomputación ha tenido una tasa revolucionaria de desarrollo tecnológico aproximadamente cuatro veces más (Paul J. Bartos, 2007).

- Inversión: gran parte de los avances de productividad actuales de la industria parecen haberse originado fuera de la industria, con fabricantes de equipos y proveedores de la industria (Paul J. Bartos, 2007).

- Empleabilidad: Los cambios que se están produciendo en el sector productivo y en el mercado en general, tendrán un impacto relevante en las capacidades laborales que se requerirán en el futuro. Esto hace que surja una nueva forma de demanda de capital humano (Consejo Minero, 2016).

(2) Características futuras del STF

- Clasificadores de mineral: Se ha estimado que la clasificación de mineral después de la trituración y pre-molienda tiene potencial anual impacto económico del orden de cientos de millones de dólares en toda la industria (M. Buxton et al., 2013).

- Energía: En promedio, en la industria minera, el 44% del total el consumo de electricidad está dedicado a las actividades de trituración y molienda (Joseph Lessard et al., 2014).

- Reciclaje: Los recursos mundiales de cobre conocidos se calculan en casi 5,8 trillones de libras, de los cuales sólo se han extraído alrededor de 0,7 billones de libras (12%) a lo largo de la historia... y casi todo eso todavía está en circulación, porque la tasa de reciclaje del cobre es mayor que la de cualquier otro metal de ingeniería. (Copper Development Association Inc., s.f.)

- Uso del cobre hoy en día: Las tendencias mundiales son de gran relevancia para el futuro de la minería. Entre los cambios que impactarán positivamente en el uso de cobre, están:
    - ✓ Mayor consumo de energía, con énfasis en una generación eficiente y más limpia.
    - ✓ Aumento en la demanda y exigencia de mayor rapidez en las tecnologías de la información.
    - ✓ Necesidades crecientes de transporte masivo, eficiente y ambientalmente limpio.
    - ✓ Mejoras en la calidad de vida respecto de la construcción, bienestar y seguridad, lo que supone consideraciones de eficiencia energética y de uso de materiales sustentables.
    - ✓ Mejores condiciones y servicios de salud, con aplicaciones de materiales autosanitizantes en hospitales e instalaciones que manipulen alimentos.
    - ✓ Mayor restricciones en el acopio de desechos domiciliarios, lo que implicará una mayor preferencia por materiales reciclables. (Codelco, s.f.).

- La mujer en la minería: Las estrategias desplegadas en las empresas para aumentar la participación femenina han evidenciado limitaciones, como el número de mujeres que se interesan en estudiar carreras relacionadas con minería (Consejo Minero, 2016).

(3) Características identificadas del sub-sistema

- Cámaras multiespectrales: La clasificación del mineral ha sido hecha a mano durante siglos identificando la mineralización en la superficie de las piedras individuales. Sin embargo, la tecnología moderna permite mirar más profundamente que sólo la superficie, y en diferentes rangos espectrales (Joseph Lessard et al., 2014).

- Impacto en la vida útil de la mina: el uso de la clasificación de mineral puede permitir que las minas aumenten sus reservas económicas y su vida útil (Joseph Lessard et al., 2014).

- Ley: A medida que se explota un yacimiento a lo largo del tiempo, disminuye la ley de mineral del mismo. Vale decir, por cada tonelada de material rocoso que se extrae, se obtiene una menor cantidad de mineral útil (Valentina De Giorgis Paris, 2016).

- Riesgo laboral: la industria de la minería posee los mejores estándares en seguridad laboral. Pasó de tener 30 accidentes incapacitantes por cada millón de horas-personas

trabajadas entre los años 1982-1987 a 1,95 entre los años 2006-2011 (Consejo Minero, 2012).

12.3.5 Compuerta A

Con el objetivo de pasar a la siguiente y última etapa de Format, se comprueba que los siguientes elementos estén completamente satisfechos.

- ✓ Lista de recursos limitantes que impide la solución de problemas que impulsan la evolución del STF - hecho en el paso A_1
- ✓ Direcciones de desarrollo de nuevas soluciones para STF (tendencias evolutivas) - hecho en el paso A_2
- ✓ Dinámica del parámetro (s) que mide rendimiento y gastos de STF (series de datos y gráficos) - hecho en el paso A_3
- ✓ Conclusiones agregadas sobre los rasgos futuros para STF - hecho en el paso A_4

12.4 T

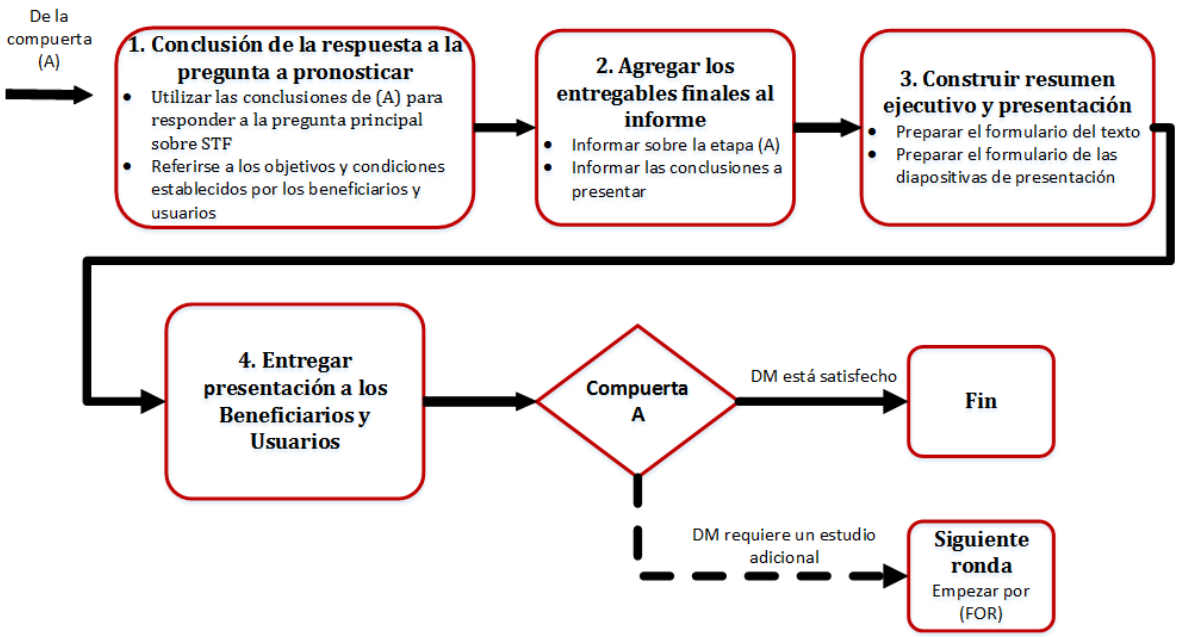


Figura 21: Diagrama de la etapa T y sus sub-etapas.

12.4.1 T_1: Responder preguntas

Conclusión de la respuesta a la pregunta a pronosticar

En este primer paso de la etapa T, se procederá a contestar las preguntas formuladas en la etapa FOR:

i. ¿Algún día el cobre repetirá el colapso de la industria calichera?
Si bien el encarecimiento del mineral permite divisar una posible aparición de bienes sustitutos en el futuro, que podrían afectar directamente al cobre, no se debe olvidar considerar las múltiples aplicaciones que posee el metal rojo, no solo como fuente de transmisión de energía eléctrica, y que le dan la posibilidad de seguir en el mercado por varias décadas más. Destaca en áreas como el transporte, la electrónica, la construcción, la agricultura, la salud y las nuevas tecnologías. Es un actor fundamental en la minería, la producción de aleaciones, la fabricación de utensilios de cocina, equipos químicos y farmacéuticos, monedas y dispositivos anticonceptivos intrauterinos, entre muchísimas otras aplicaciones (Patricio Meller, 2013).

ii. ¿Cuántos años de explotación de las reservas de cobre chilenas quedan?
Chile cuenta con las mayores reservas de cobre del mundo con un 29,2% seguido por Australia con un 12,2% y Perú con un 11,4% (Comisión Nacional de Productividad, 2016).
En los últimos 16 años se han encontrado en territorio chileno 35 yacimientos de cobre, incrementando en más de 208,6 [Mt] de cobre a los recursos y reservas anteriormente conocidos. El 94% del contenido de cobre en recursos y reservas se encontró antes del año 2010, y si bien la inversión en exploración ha aumentado significativamente desde la fecha, el éxito de las campañas no ha sido proporcional a este incremento en el presupuesto de exploración. Aun así, comparando los resultados de exploración con el resto del mundo, Chile es el país que lleva el primer lugar tanto en número de hallazgos como en la cantidad de cobre contenido en estos depósitos (Cochilco, 2016).
Según un informe realizado por Codelco y entregado a la Superintendencia de Valores y Seguros, se afirma que hay recursos identificados por un total de 251 millones de toneladas, con lo cual Chile cuenta con reservas para producir cobre durante un total de 131 años (http://www.emol.com/noticias/economia/2003/10/27/127410/codelco-chile-cuenta-con-reservas-de-cobre-para-131-anos.html).

iii. ¿Surgirán nuevas alternativas de extracción minera?
La recuperación de cobre desde la roca madre se realiza convencionalmente mediante dos vías: la concentración, aplicada a los sulfuros, y la lixiviación, a los óxidos. (Minería Chilena, 2015). La manera tradicional como se extrae el cobre, con el paso de los años, se ha ido reemplazando por tecnologías más eficientes y amigables con el medio ambiente, las cuales no excluyen la posibilidad de aplicar un proceso de clasificación de minerales dentro de la planta.

12.4.2 T_2: Resultados del informe

Agregar los entregables finales al informe

El informe del proyecto sobre la aplicación de un clasificador de sensor en la minería de cobre chilena, utilizando la metodología FORMAT, será considerado como el presente documento, el cual será entregado tanto a beneficiaros como usuarios.

12.4.3 T_3: Desarrollar informes

Construir resumen ejecutivo y presentación

En esta etapa se pide formular el resumen ejecutivo, el cual ya se encuentra en el presente informe. Por otra parte se pide responder a las interrogantes formuladas en la etapa FOR_2, las cuales ya fueron respondidas en la etapa T_1. Finalmente la presentación de datos se adjunta como figuras en los anexos.

12.4.4 T_4: Entregar presentación

Entregar presentación a beneficiarios y usuarios

El resultado de este proyecto, sobre pronóstico tecnológico se presenta en una reunión en vivo con usuarios y beneficiarios para asegurar la entrega adecuada de los resultados del proyecto. En este caso, los beneficiarios son las mineras de cobre chilenas, como se nombró en la etapa FOR, pero además se considera como beneficiario al Centro Científico Tecnológico de Valparaíso de la UTFSM, cuya razón de ser está orientada al desarrollo del conocimiento, a las iniciativas de innovación y al emprendimiento. Es por esto último que también se considera beneficiario del proyecto, ya que este centro podría desarrollar dentro de su establecimiento, el proyecto de clasificación de mineral mediante sensores con tecnología NIR, al poseer instalaciones de alta tecnología e investigadores con años de experticia.

12.4.5 Compuerta T

A continuación se verifican los pasos realizados hasta el momento del término de este informe, de la última etapa de la metodología:

- ✓ Escriba un resumen ejecutivo
- ✓ Escribir un informe
- ✓ Preparar una presentación de los resultados
  Entregar la presentación

14. Conclusiones

Las conclusiones se dividirán en dos partes, la primera asociada a los objetivos específicos, es decir, al resultado revelado gracias a la metodología FORMAT y la segunda parte corresponderá a las conclusiones respecto del objetivo general: la evaluación de la metodología FORMAT como de pronóstico tecnológico.

En cuanto a los resultados arrojados por la metodología FORMAT, para el caso de estudio de la industria cuprífera en Chile, la tecnología de clasificación de minerales, basada en sensores de visión NIR es la mejor alternativa para aplicar, dado que posee menos barreras actuales para implementar en la industria minera, no obstante, la dificultad es que en Chile aún no se ha invertido lo suficiente para desarrollar este tipo de tecnología, lo que es fundamental dado que los algoritmos de procesamiento de imágenes de cada uno estos equipos necesitan ser debidamente calibrados y estudiados para poder colocarlos en el mercado. A pesar de que, gracias al estudio de patentes, se vislumbra un desarrollo técnico importante en el área de utilización de la tecnología NIR, éstas fueron realizadas en el extranjero y dada las altas cantidades de procesamiento de flujo de mineral que se manejan en la industria del cobre chileno (200 [ton/hr] Apróx.) es necesario adaptar el uso de estas tecnologías a la realidad de nuestro país.

Lo que sí permitió garantizar FORMAT es que el contexto en el que se encuentra la industria es el adecuado para aplicar este proyecto, ya que primero que todo queda mucho cobre que extraer todavía (reservas de más de130 años), por lo que aún existe un umbral de tiempo para el desarrollo de la tecnología que se analizó en este caso de estudio; así como las infinitas posibilidad de usos que ofrece el metal rojo, que implica una barrera menos en cuanto a posibles sustitutos del mineral dado las oportunidades de generar nuevas áreas de negocio que permiten aumentar el valor de este producto; o bien las altas expectativas que China eleve su consumo de cobre chileno, lo que se traduciría en el aumento del precio del cobre y por ende la mejora la rentabilidad del negocio. Aumentado la posibilidad de destinar más dinero en el área de desarrollo tecnológico.

Instalar este tipo de tecnología en el proceso productivo del cobre generaría enormes beneficios, puesto que al separar las rocas que provienen directamente del yacimiento, en dos categorías: mineral de alta ley y material estéril, permitirá que sólo el material de interés pase a la planta de procesamiento y por ende, al tratar un flujo menor, la energía necesaria para convertirlo en producto final será menor y como consecuencia los costos disminuirán; lo anterior sumado a un precio del cobre mayor (comportamiento que estaría respaldado por los pronósticos realizados) facultará a la industria de generar utilidades mayores, y así finalmente aumentar el PIB de Chile.

Con respecto a la segunda parte de las conclusiones, como se mencionó en el principio de este informe, los casos de estudio a los que se les ha aplicado la actual metodología han sido de autoría de miembros del mismo consorcio; no existen aplicaciones desarrolladas por gente externa al proyecto FORMAT, es por esto que se decidió que una alumna de pregrado la aplicase

como tema de memoria, con el fin de determinar los pro y los contras de la metodología en cuestión.

Cabe destacar que la metodología posee su propia página web (http://handbook.format-project.eu/) la cual está organizada de tal forma, que cada etapa contenga los siguientes puntos: diagrama de flujo, instrucciones, consejos, sugerencia de lecturas asociadas al tema y ejemplos.

La etapa "(FOR)mular" es la etapa más clara, respecto de las instrucciones a seguir, por lo que no existió mayor complicación en su resolución, salvo que requiere de un análisis completo del contexto en el que se desarrolla el proyecto significando el requerimiento de un equipo multidisciplinario desde la etapa 0 del análisis, con la finalidad de abarcar la mayor cantidad de variables que se ven involucradas, además de considerar distintos puntos de vista.

En la etapa "(M)odelar" comienza a elevar el grado de detalle técnico requerido en los analistas para lograr una comparación adecuada entre las tecnologías a contrastar, además de poseer las herramientas adecuadas para realizar la decisión de la mejor alternativa, la que se escogerá mediante parámetros específicos y que son considerados como críticos por los mismos especialistas. Agregar también, que en la sub-etapa M_5 no se logra captar adecuadamente cómo completar la pantalla múltiple (procedimiento recomendado en las instrucciones de la metodología); por lo cual se procede a hacer uso de los ejemplos ofrecidos por FORMAT (descargados directamente de la página web), que lamentablemente tienden a confundir por no seguir el mismo patrón entre ellos.

A partir de la etapa A, es cuando comienza la fase más compleja de la metodología ya que en la sub-etapa A_2 exige que al menos un miembro del equipo básico debe estar familiarizado con el razonamiento analógico aplicado a patrones evolutivos, por ejemplo, la aplicación de las Leyes TRIZ de la Evolución de Sistemas de Ingeniería para visualizar posibles escenarios evolutivos de sistemas técnicos, lo cual es advertido por la misma metodología al momento de leer las instrucciones; de la misma forma se exige el conocimiento previo del análisis de patentes con objeto de determinar o de prever la orientación de la evolución tecnológica además de determinar la posición relativa de una empresa en el mercado. Otro punto de retraso en el análisis ocurrió en la sub-etapa A_3 al recomendar el uso de la curva-S, función matemática que analiza el comportamiento logístico de los datos, pero de la cual no existe mayor información acerca de su aplicación, al tratarse de una función más compleja, sin mencionar que las bases de datos reales se ven afectadas por factores externos que modifican el supuesto de su comportamiento logístico.

Finalmente en la etapa (T) baja la complejidad de la metodología, al tratarse de la traducción de las conclusiones sobre los rasgos del STF a los usuarios y beneficiarios. Donde lo difícil sería el cómo preparar la presentación, de tal modo que sea atractiva y que los resultados sean compresibles para cualquier persona, sea cual sea su área de trabajo dentro de la empresa.

Tras analizar etapa por etapa se puede concluir que es posible la utilización de FORMAT por parte de una persona inexperta en pronósticos (específicamente carente de las herramientas de TRIZ, curva logística S, entre otros) ya que quedó en evidencia que los resultados arrojados ayudan enormemente en la toma de decisiones, permitiendo un acercamiento a la solución satisfactoria, sin embargo, no permite tomar una decisión definitiva con los datos obtenidos, ya que herramientas como éstas permiten una mayor precisión en los

resultados, sobre todo para la envergadura de este caso de estudio, en que una mala aproximación puede llevar a pérdidas de dinero irrecuperables,. Si el proyecto al cual se aplicara FORMAT posee una inversión de magnitudes parecidas a las expuestas en el caso de la industria cuprífera chilena, entonces es imperativo incluir dentro del equipo de trabajo a analistas que tengan experiencia tanto en problemas de inventiva como en el análisis de evolución de parámetros y así disminuir el sesgo en los resultados.

15. Bibliografía

Alejandra Parra (2011) Construcción de una función de costos operacionales para producción de cobre.

BCS, Incorporated (2007) Mining Industry Energy Bandwidth Study.

Bernhard Hill (2005) The History of Multispectral Imaging at Aachen University of Technology.

Canadian Mining Journal (2015) Mexican minerals. Sensor-based sorters enable miners to process ore faster.

Celio Pasquini (2003) Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications.

Christian Jönsson (2014) Sensor based sorting technology.

Christopher Nikulin et al. (2011) FORMAT - Building an original methodology for Technology.

Christopher Nikulin et al. (2016) A Framework of Sorting Technologies and Its Applicability to Copper Mining.

Cochilco (2016) Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1995-2015.

Cochilco (2016) Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera.

Codelco (s.f.) Nuevos usos del cobre. https://www.codelco.com/nuevos-usos-del-cobre/prontus_codelco/2011-07-08/130234.html

Comisión Nacional de Productividad (2016) Informe Preliminar Productividad de la Gran Minería del Cobre.

Consejo Minero (2012) Chile y la minería: éxitos y desafíos compartidos.

Consejo Minero (2016) Fuerza laboral de la gran minería chilena 2015-2024.

Consejo Minero (2016) Minería en números.

Consejo Minero (2017) Minería en cifras, Abril.

Copper Development Association Inc. (s.f.) Copper - the World's Most Reusable Resource.

D. J. Peterson et al. (2001) New Forces at Work in Mining. Indusry Views of Critical Technologies.

D. Yudelman (2006) New mining technology. The Northern Miner.

Dmitry Kucharavy et al. (20015) Application of Logistic Growth Curve.

Dmitry Kucharavy et al. (2005) Problems of Forecast.

Eduardo Piñones Zuleta (2016) Caso de estudio de la aplicación de una metodología de diseño en el contexto de la industria minera.

Fundación Chile (2016) Desde el cobre a la innovación. Roadmap Tecnológico 2015-2035.

G. Hilson (2000) Barriers to implementing cleaner technologies and cleaner production (CP) practices in the mining industry: a case study of The Americas.

Gaetano Cascini (2012) TRIZ-based Anticipatory Design of Future Products and Processes.

Henning Knapp et al., (2014) Viable Applications of Sensor-Based Sorting for the Processing of Mineral Resources.

http://procobre.org/es/ El cobre 100% reciclable, además es un metal amigable con el medio ambiente.

http://www.aminerals.cl/ (2014) Industria minera chilena tiene como gran desafío mejorar su productividad.

http://www.consejominero.cl/mujer-y-mineria/ Mujer y minería.

http://www.wipo.int/portal/es/ (2015) La innovación en la minería.

INE, Chile (2008) Distribución y consumo energético en Chile.

José Miguel Benavente H. (2006) Antecedentes para el diseño de una política tecnológica nacional.

Joseph Lessard et al. (2014) Development of ore sorting and its impact on mineral processing.

M. Bregonje (2015). Patents: A unique source for scientific technical informatión in chemestry related industry?

M. Buxton et al. (2013) The use of sensor derived sensor data in real time mine optimization: a preliminary overview and assessment of techno-economic significance.

Marco Antonio Alfaro Sironvalle (2007) Estimación de Recursos Mineros.

Miguel Concha M. Economía y negocios (2012) Grandes mineras advierten caída de casi 50% en leyes de mineral de cobre en 20 años.

Minería Chilena (2015) Hidrometalurgia: En la búsqueda de nuevas alternativas.

Minería Chilena (2016) Cuánta electricidad consumirá la minería hacia 2026.

National Research Council (2002) Evolutionary and Revolutionary Technologies for Mining.

Niccolò Becattini (2013) Product and process modelling – state of the art.

Niccolò Becattini et al. (2014) ARIZ85 and Patent-driven Knowledge Support.

Nuria Prieto Benavides (2006) Aplicación de la tecnología NIRS para estimar parámetros indicativos de la calidad de la carne de vacuno.

Patricio Meller (2003) El cobre chileno y la política minera.

Patricio Meller (2013) El rol del cobre para que Chile alcance el pleno desarrollo.

Patricio Meller (2013) La viga maestra y el sueldo de Chile: mirando el futuro con los ojos del cobre.

Paul J. Bartos (2007) Is mining a high-tech industry? Investigations into innovation and productivity advance.

Perrin Meyer et al. (1991) A Primer on Logistic Growth and Substitution; The mathematics of the Logllet Sab Software.

Portal Minero (2006) Manual General de Minería y Metalurgia.

Portal Minero (2014) Expertos anticipan importante baja en los costos de producción de la minería.

Robert G. Cooper (2008) Perspective: The Stage-Gate® Idea to Launch Process Update, What´s new and NexGe Systems.

Salter, J. D., & Wyatt, N. P. G. (1991). Sorting in the minerals industry: past, present and future.

Sustainable Development Strategies Group (2010) Report: Current issues in the Chilean mining sector.

Valentina De Giorgis Paris (2016) Competitividad de la industria minera.

William Herschel (1785) Philosophical Transactions: On the Construction of the Heavens.

16. Anexos

A continuación de adjuntas las imágenes de la presentación de datos, requerido en el paso T_3:

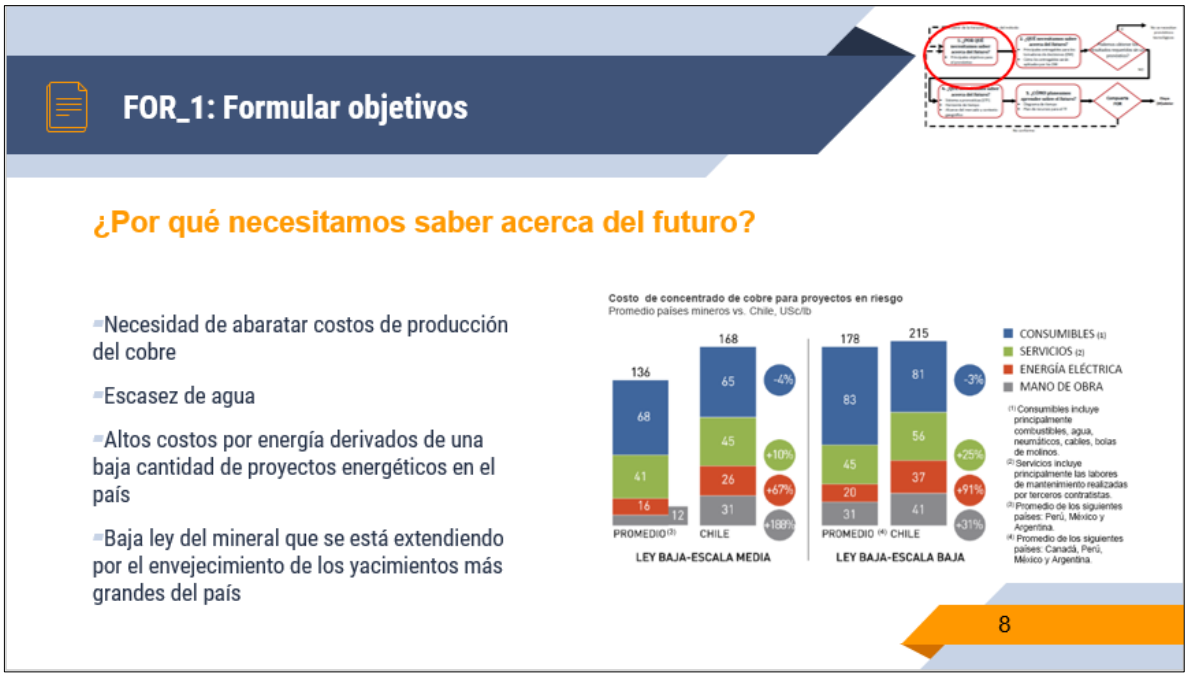


Figura 22: Diapositiva 1

Figura 23: Diapositiva 2

Figura 24: Diapositiva 3

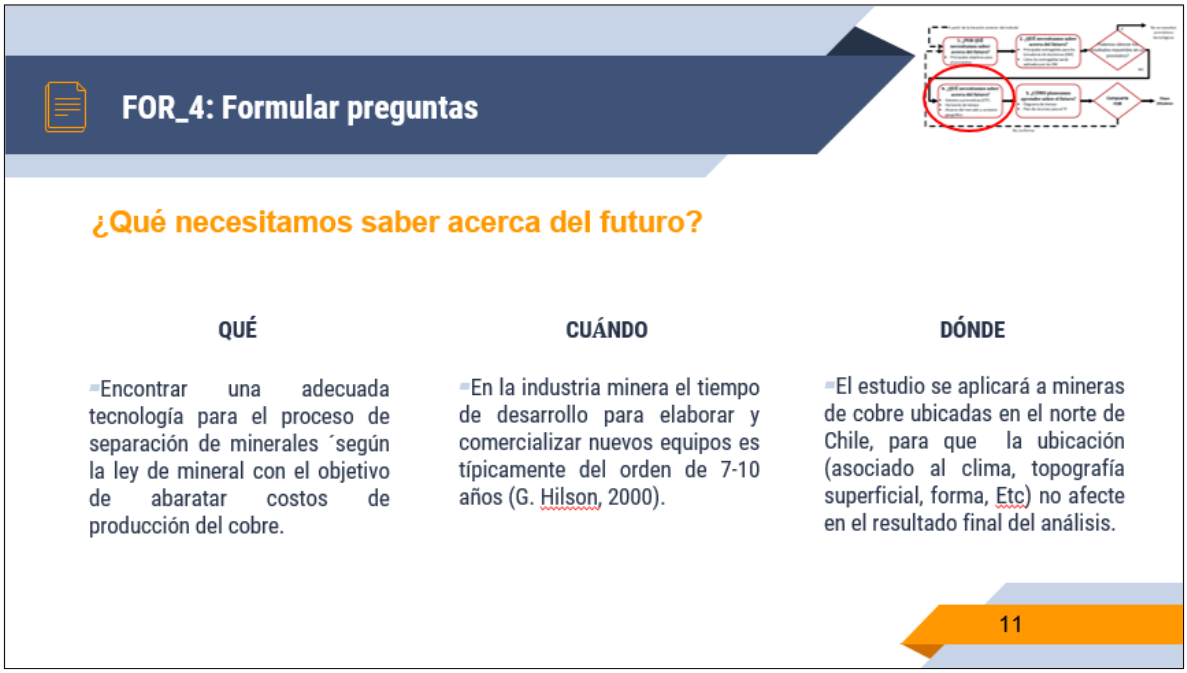
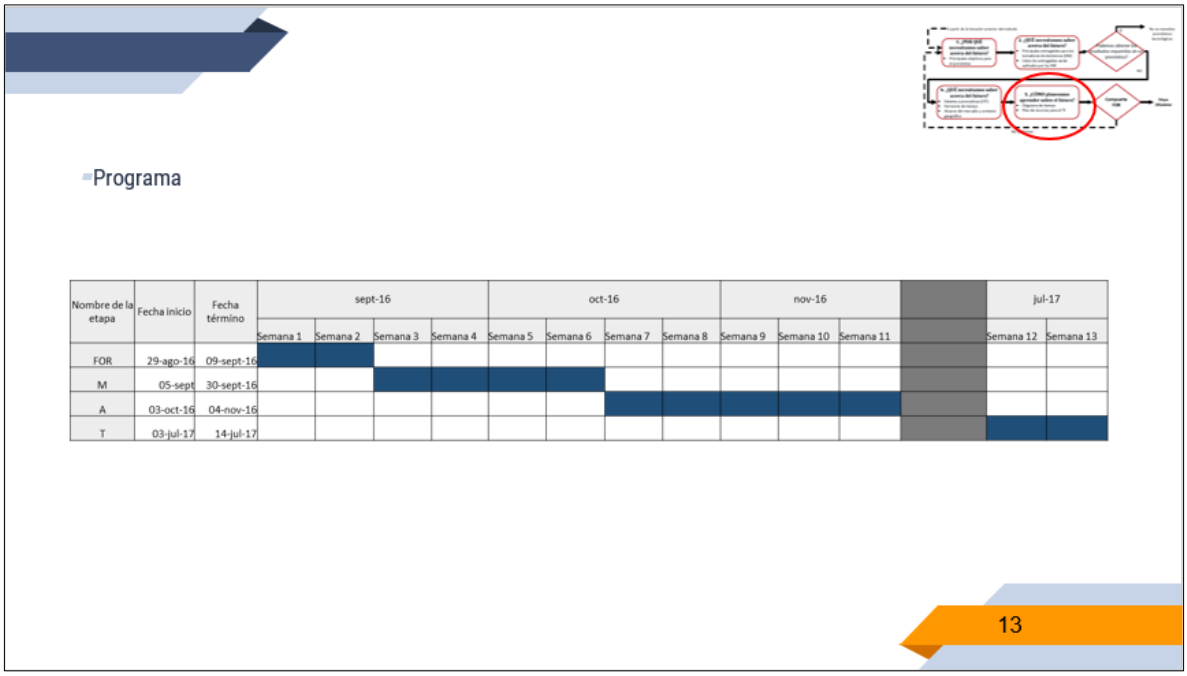


Figura 25 Diapositiva 4

Figura 26: Diapositiva 5



Nombre de la etapa	Fecha inicio	Fecha término	sept-16				oct-16				nov-16				jul-17	
			Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11		Semana 12	Semana 13
FOR	29-ago-16	09-sept-16														
M	05-sept	30-sept-16														
A	03-oct-16	04-nov-16														
T	03-jul-17	14-jul-17														

Figura 27: Diapositiva 6

Figura 28: Diapositiva 7

Figura 29: Diapositiva 8

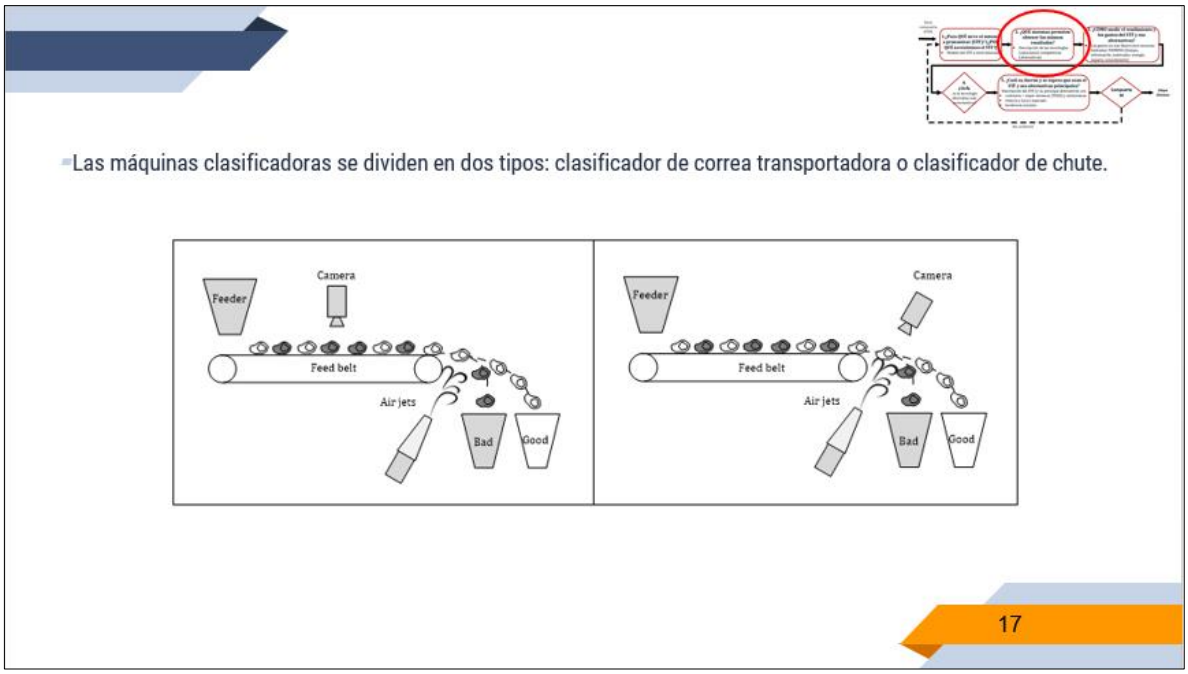


Figura 30: Diapositiva 9

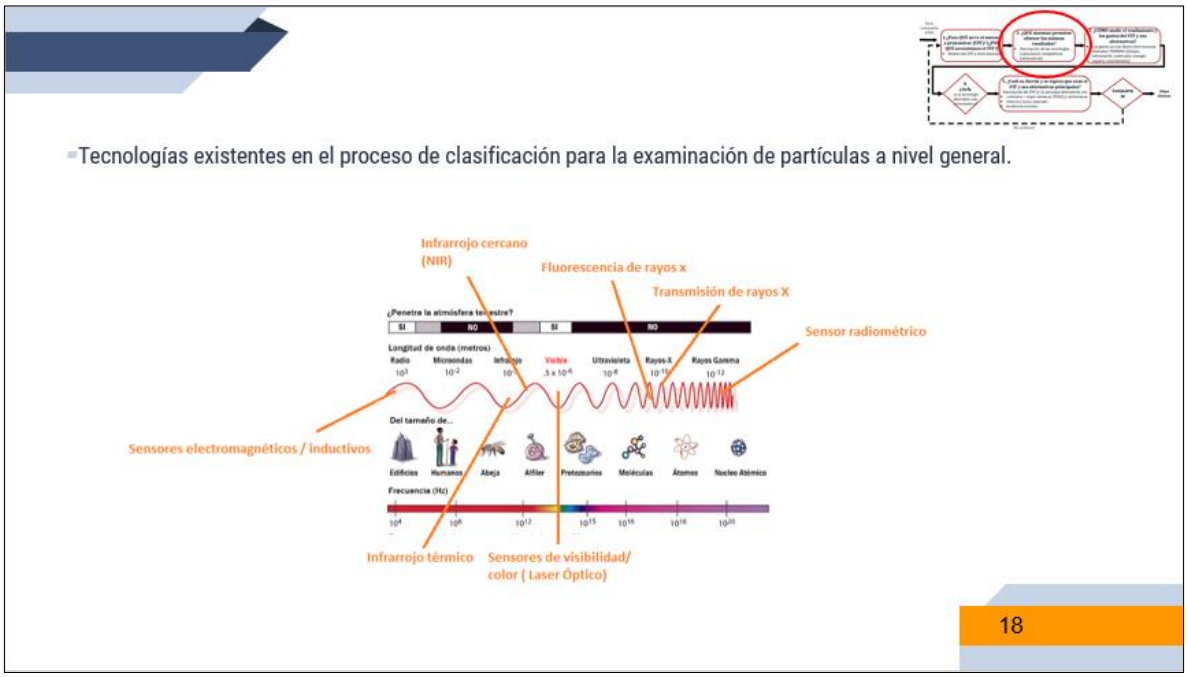


Figura 31: Diapositiva 10

#		Problema	Parámetro
1	Funcionamiento	Grandes cantidades de material que debe ser procesado	Capacidad de procesamiento [ton/hr]
2			Tamaño de la roca (partícula) para que el sensor de la tecnología funcione correctamente [mm]
3		Seguridad de los trabajadores	Número de operadores [personas]
4			¿Operador trabaja directamente con el material a procesar? [Sí o No]
5		Obtención de datos	Rapidez de captación en información [seg]
6		Grandes niveles de contaminación producidos por la industria minera	Contaminación producida [ppm/día]
7		Precisión	Resolución de la cámara [mm]
8	Costos	Línea de producción no debe detenerse por mucho tiempo ya que significa enormes pérdidas monetarias	Duración de la mantención [hr]
9			Tiempo entre mantenimientos [hr]
10			Disponibilidad de repuestos [hrs]
11		Presupuesto	Costo unitario de la tecnología [$]
12			Consumo de energía [kWh]
13		Tiempo	Vida útil [año]

Figura 32: Diapositiva 11

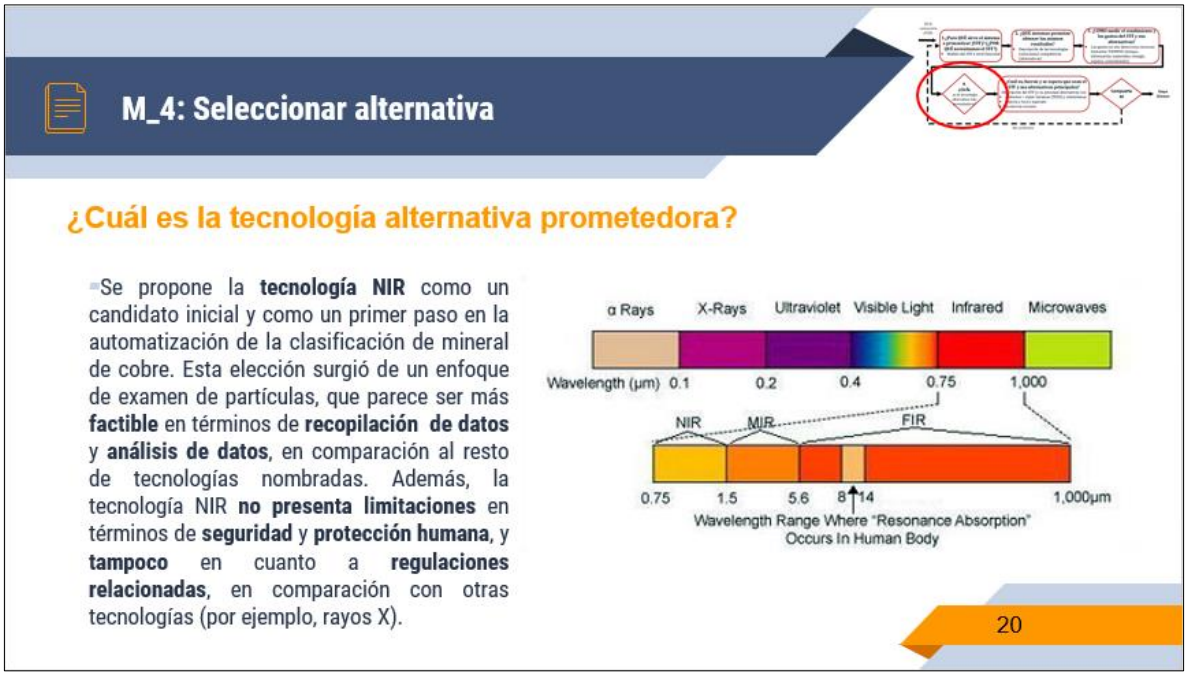


Figura 33: Diapositiva 12

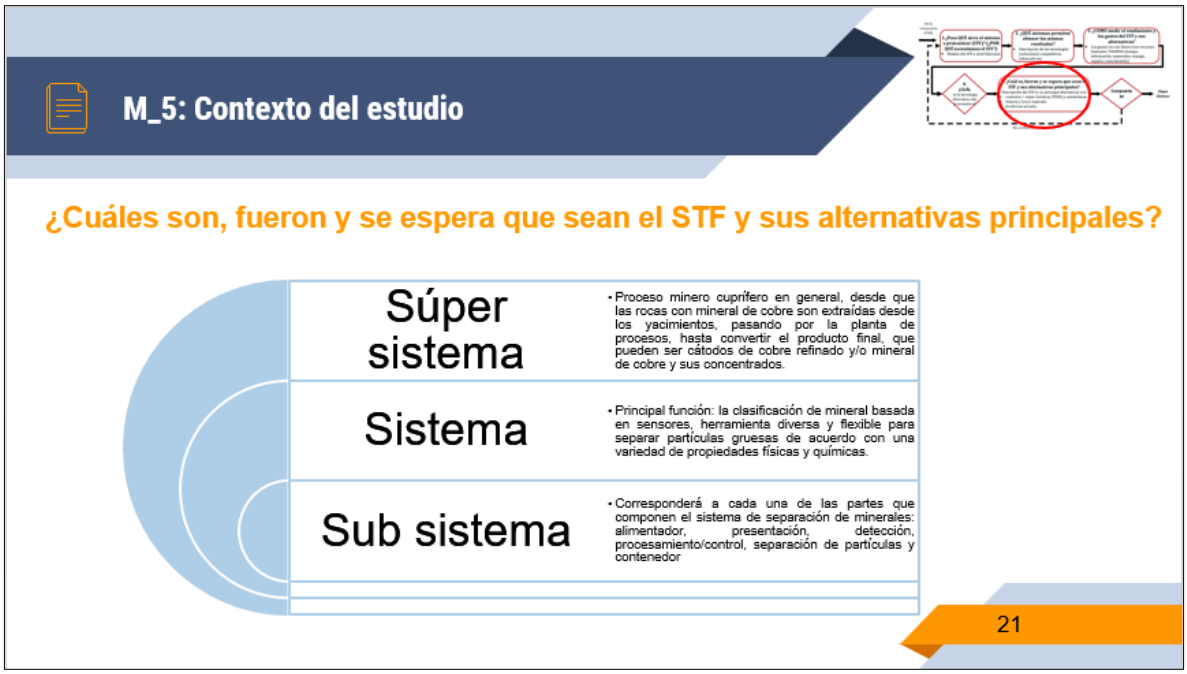


Figura 34: Diapositiva 13

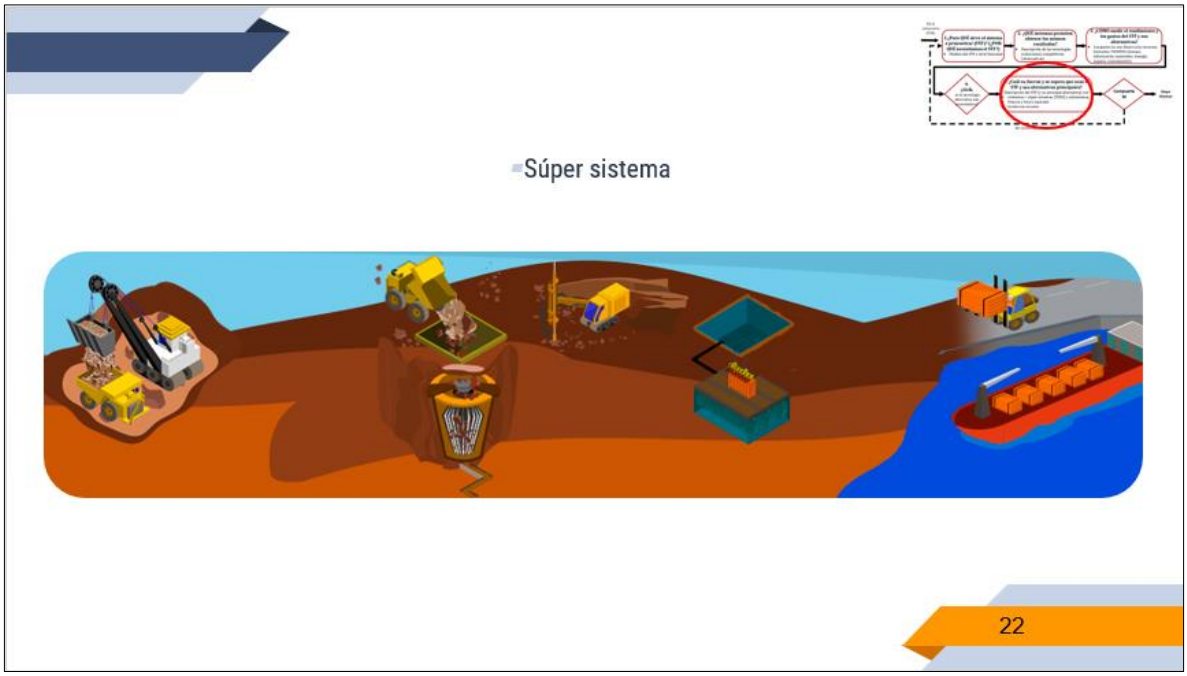


Figura 35: Diapositiva 14

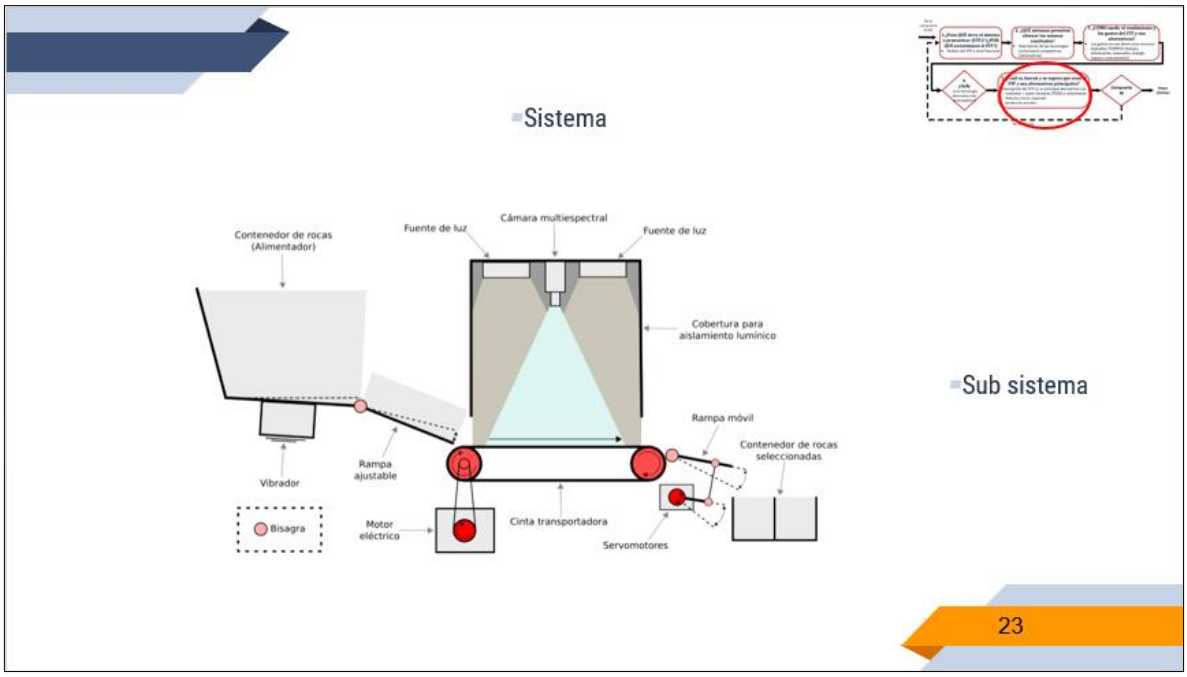
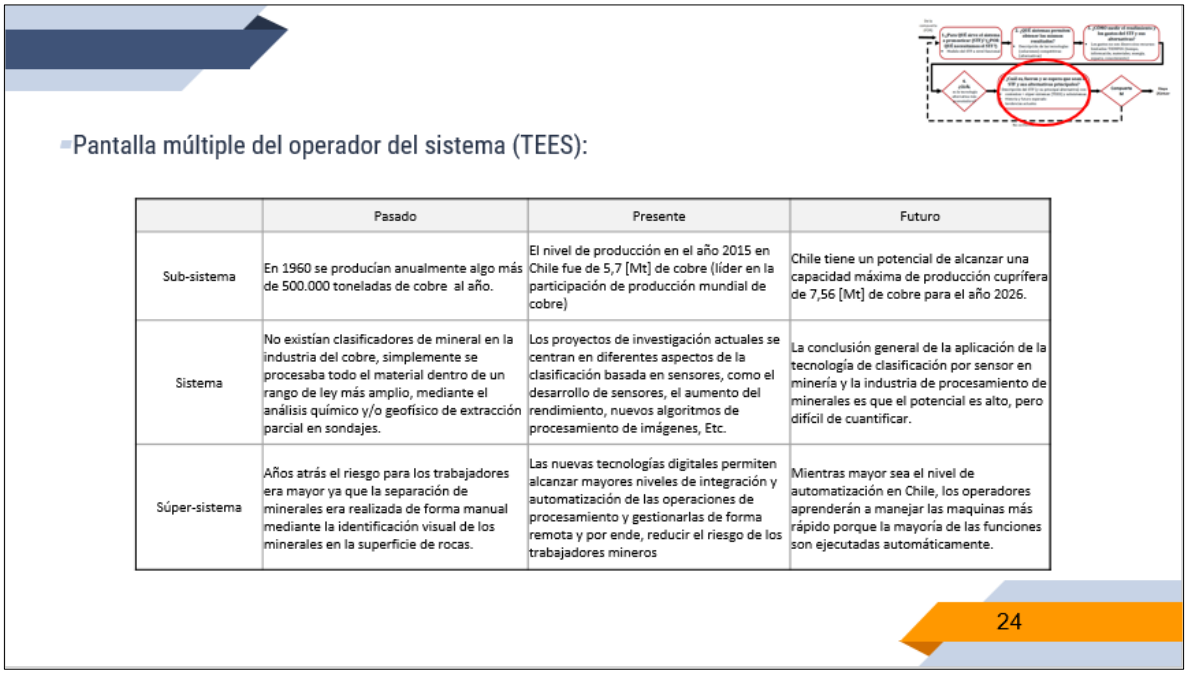


Figura 36: Diapositiva 15



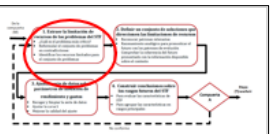
Pantalla múltiple del operador del sistema (TEES):

	Pasado	Presente	Futuro
Sub-sistema	En 1960 se producían anualmente algo más de 500.000 toneladas de cobre al año.	El nivel de producción en el año 2015 en Chile fue de 5,7 [Mt] de cobre (líder en la participación de producción mundial de cobre)	Chile tiene un potencial de alcanzar una capacidad máxima de producción cuprífera de 7,56 [Mt] de cobre para el año 2026.
Sistema	No existían clasificadores de mineral en la industria del cobre, simplemente se procesaba todo el material dentro de un rango de ley más amplio, mediante el análisis químico y/o geofísico de extracción parcial en sondajes.	Los proyectos de investigación actuales se centran en diferentes aspectos de la clasificación basada en sensores, como el desarrollo de sensores, el aumento del rendimiento, nuevos algoritmos de procesamiento de imágenes, Etc.	La conclusión general de la aplicación de la tecnología de clasificación por sensor en minería y la industria de procesamiento de minerales es que el potencial es alto, pero difícil de cuantificar.
Súper-sistema	Años atrás el riesgo para los trabajadores era mayor ya que la separación de minerales era realizada de forma manual mediante la identificación visual de los minerales en la superficie de rocas.	Las nuevas tecnologías digitales permiten alcanzar mayores niveles de integración y automatización de las operaciones de procesamiento y gestionarlas de forma remota y por ende, reducir el riesgo de los trabajadores mineros	Mientras mayor sea el nivel de automatización en Chile, los operadores aprenderán a manejar las maquinas más rápido porque la mayoría de las funciones son ejecutadas automáticamente.

24

Figura 37: Diapositiva 16

A_1: Identificar recursos limitantes



Extraer la limitación de recursos de los problemas del STF.

Problema	Descripción	Recursos limitantes	Unidades de medida
1	Se manejan grandes flujos de material en la industria del Cu	Capacidad de la nueva tecnología	[ton/h]
2	La ley de cada rocas debe ser similar	Precisión del sensor	Mediante muestras de rocas
3	Antes de pasar por el sensor de clasificación, las rocas deben estar en la cinta trasportadora pero sin hacer contacto entre sí, distribuidas en una capa uniforme.	Tiempo que tome disponer las piedras de forma correcta y espacio (ancho de la cinta transportadora)	[seg] y [min]
4	La tecnología requiere de preparación y prueba	Tiempo que tome el desarrollo y adaptación de la nueva tecnología al contexto de la industria minera de cobre	[meses]
5	Costo de inversión alta	Dinero	[US$]

26

Figura 38: Diapositiva 17

A_2: Reconocer los patrones de evolución

Definir un conjunto de soluciones que direccionen las limitaciones de recursos.

- En los inicios de su descubrimiento y desarrollo en **1970** el principal inconveniente de la clasificación basada en sensores era la **velocidad de procesamiento**.
- Hoy en día, sin embargo, la fiabilidad y la velocidad del **procesamiento informático han eliminado esa barrera**.
- Las técnicas de formación de imágenes y ensayo han mejorado, proporcionando así un **mayor rendimiento** y mediciones de densidad **más precisas** lo que han permitido el procesamiento de partículas más pequeñas.
- Más allá de sus beneficios financieros, la clasificación por sensor también ofrece una **ventaja ambiental**. En primer lugar, es un proceso completamente **seco y libre de químicos**. En segundo lugar, **reduce la cantidad de relaves** procesados, lo que requiere instalaciones más pequeñas de contención de relaves y tratamiento.

27

Figura 39: Diapositiva 18

Figura 40: Diapositiva 19

Figura 41: Diapositiva 20

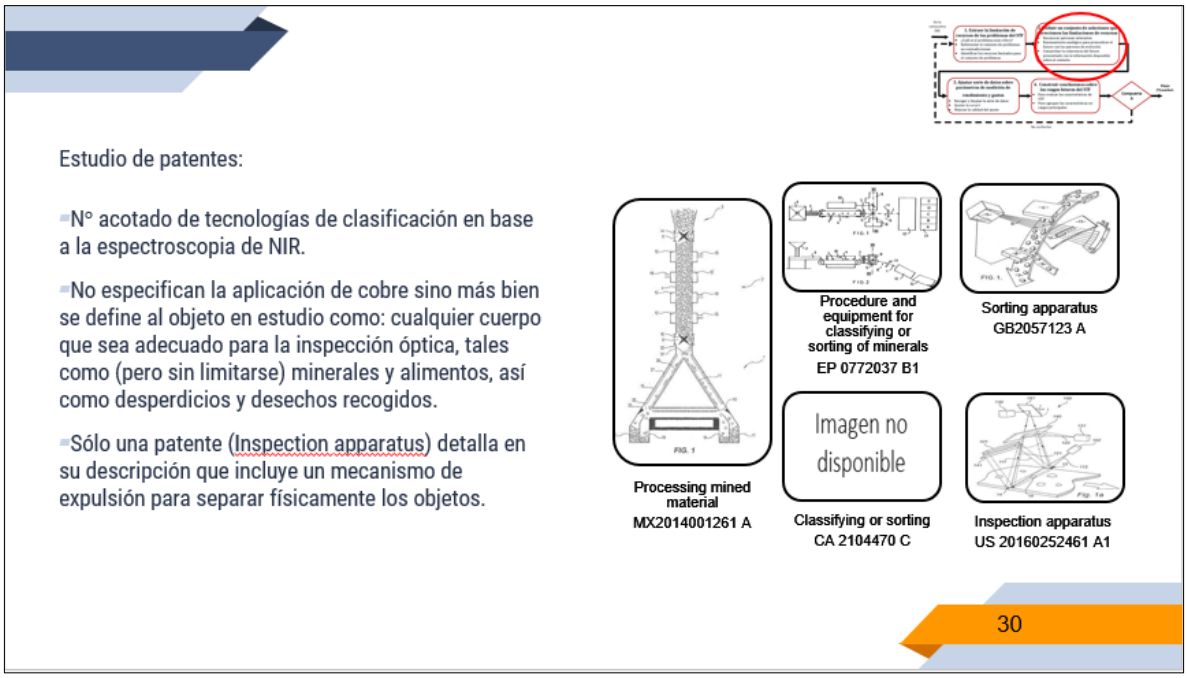


Figura 42: Diapositiva 21

Figura 43: Diapositiva 22

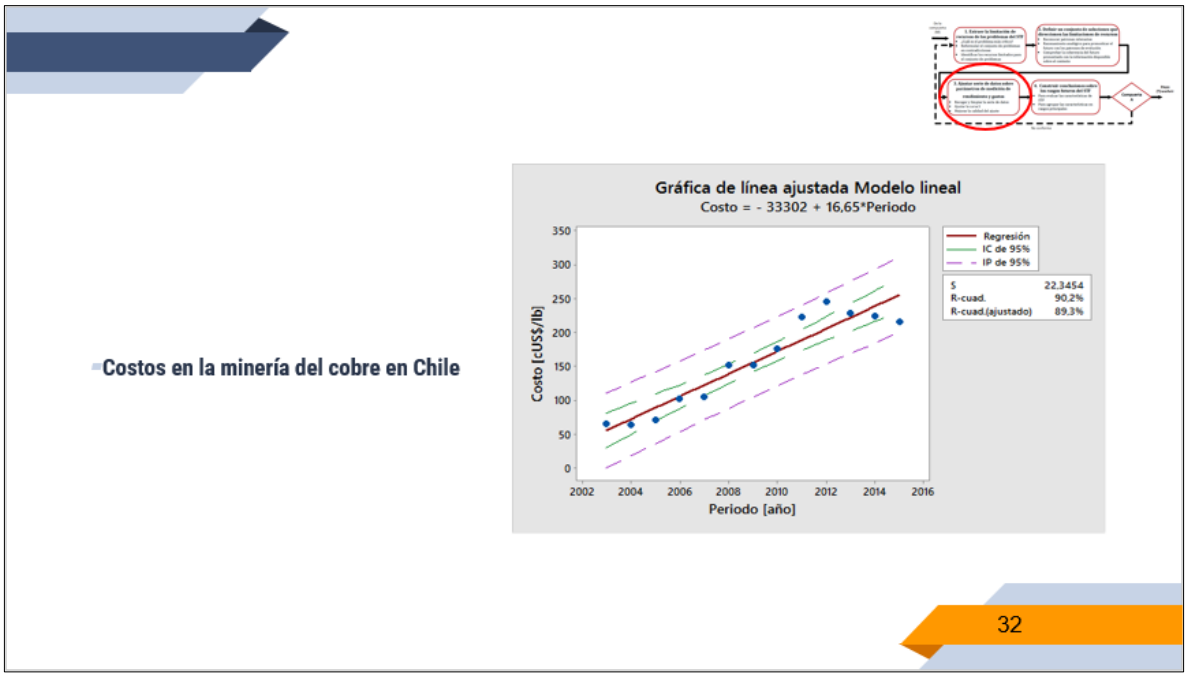


Figura 44: Diapositiva 23

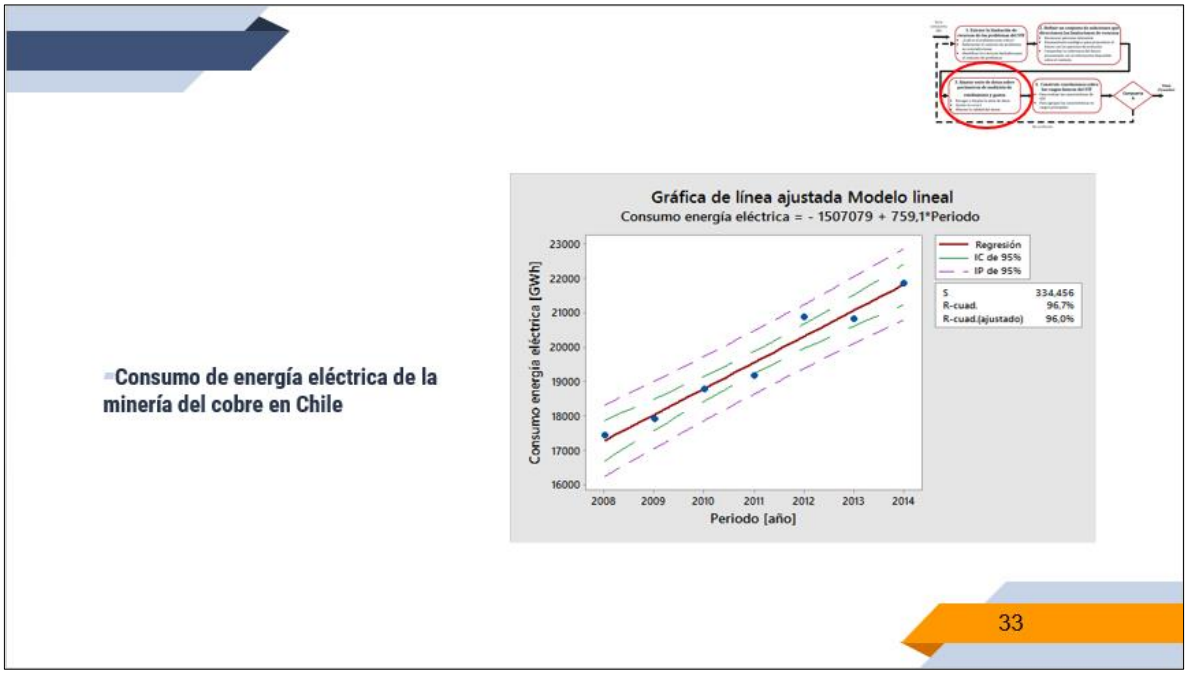


Figura 45: Diapositiva 24

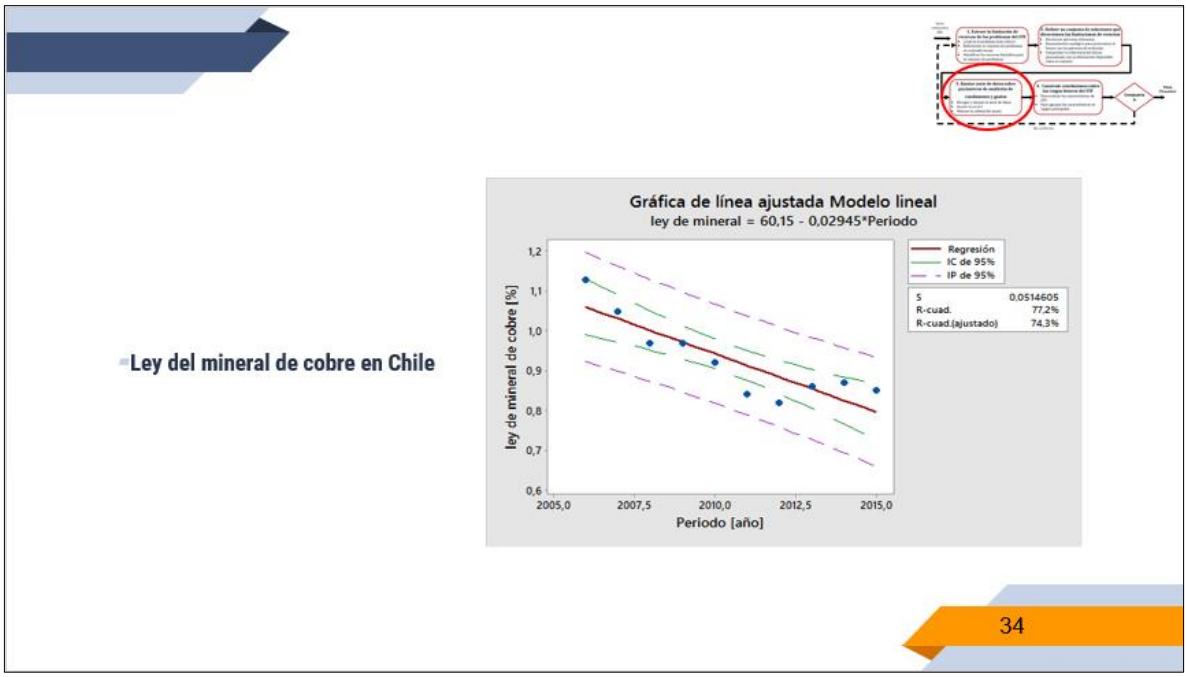


Figura 46: Diapositiva 25

Figura 47: Diapositiva 26

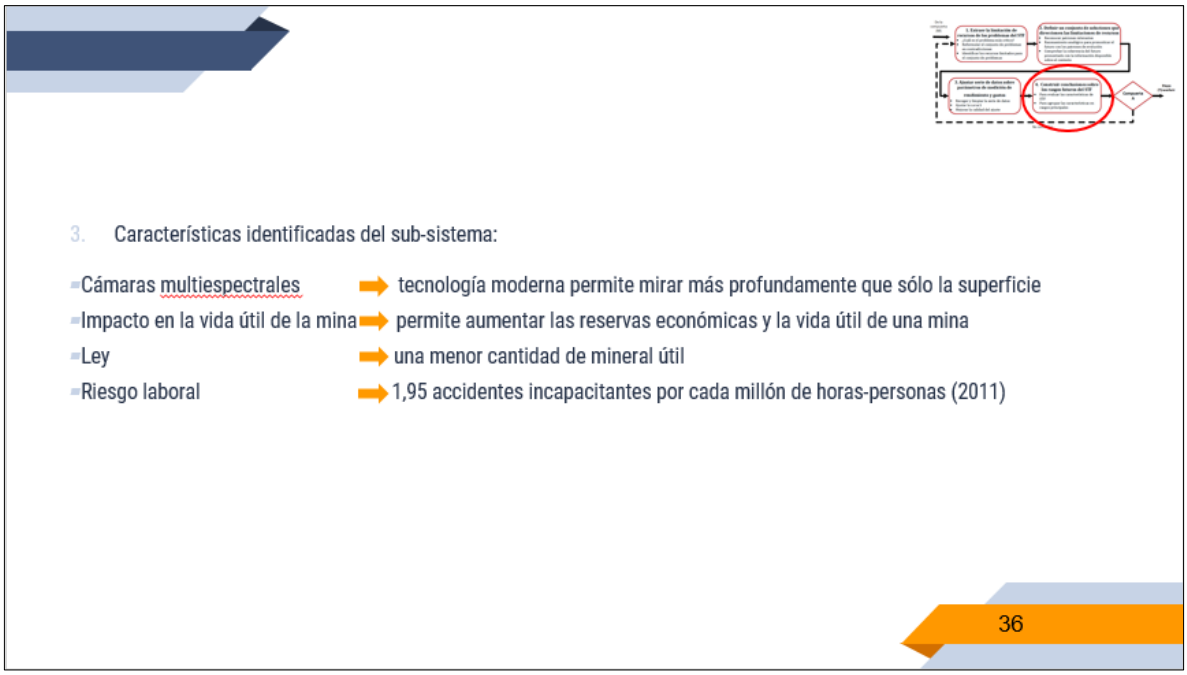


Figura 48: Diapositiva 27

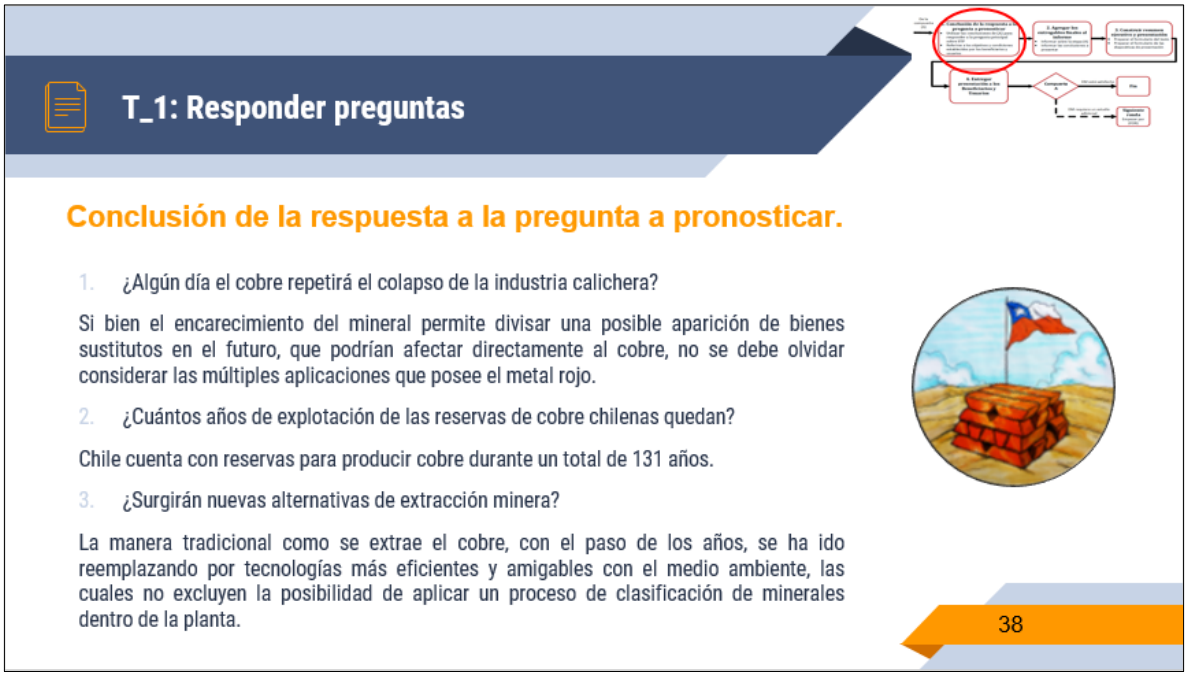


Figura 49: Diapositiva 28