



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

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SISTEMA DE DEMARCACIÓN TOPOGRÁFICA  
VIRTUAL**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE  
EMPRESAS

**FELIPE EDUARDO CÁRDENAS DÍAZ**

PROFESOR GUÍA:

ENRIQUE JOFRÉ ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

GERARDO DÍAZ RODENAS

JUAN DÍAZ GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:**  
Magister en Gestión y Dirección de Empresas  
**POR:** Felipe Cárdenas Díaz  
**FECHA:** Abril 2018  
**PROFESOR GUÍA:** Enrique Jofré Rojas

## **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SISTEMA DE DEMARCACIÓN TOPOGRÁFICA VIRTUAL**

En un momento en que la seguridad, la productividad y el control de costos son el foco en la industria minera, eliminar procesos poco eficientes que pueden involucrar un riesgo, y reemplazarlos con tecnología moderna y automatización es una alternativa atractiva para una operación como Codelco Radomiro Tomic. Por ello, surge la necesidad de diseñar un sistema para reemplazar las demarcaciones físicas instaladas de forma manual por referencias virtuales.

En este estudio fue clave integrar en su desarrollo a las áreas de la División involucradas, recogiendo sus inquietudes, prioridades y aprovechando su conocimiento experto del proceso y sus nexos con proveedores de tecnología, lo que permitió realizar una evaluación adecuada. Actualmente existen aplicaciones específicas para algunas de las demarcaciones requeridas, y para otras se requiere un desarrollo, lo que genera un desequilibrio entre la forma de abordar las dos principales necesidades de demarcación de la División. Por lo tanto, se optó por profundizar en aquel desarrollo que, teniendo un impacto igualmente relevante, es de una implementación más sencilla, como son las demarcaciones de perforación de control pared; para luego, probando el éxito de esta iniciativa de transformación digital, proseguir con la ampliación de la misma. En este cometido un aspecto relevante es el plan de implementación, el que requiere una etapa previa de pilotaje y validación industrial, así como una adecuada estrategia para la gestión del cambio.

Para la evaluación económica, a través de la estimación del aporte diferencial de beneficio ( $\Delta$ VAN) que esta iniciativa agregaría a Radomiro Tomic, se utilizó una alternativa técnicamente satisfactoria, cuyos costos fueron estimados directamente con la oferta de un proveedor, y su beneficio a través de los ahorros que generaría y los aumentos de productividad que su implementación apalancaría. La evaluación de este proyecto se realizó con una tasa de descuento del 8%, y da por resultado un  $\Delta$ VAN de 564 KUSD a cinco años y 153 KUSD a tres años, capaz por ende de autofinanciarse. Luego, si se incorpora en dicha estimación, el ahorro potencial al evitar un accidente grave o fatal (5 MUSD por día de detención), este diferencial de beneficio aumenta significativamente, haciendo a este proyecto mucho más rentable.

Finalmente, se confirma la viabilidad técnica/económica del diseño de solución propuesto y la necesidad de su ejecución, que se recomienda firmemente concretar en el corto plazo. Se debe considerar la prueba piloto, la que en un plazo de 60 días ayudará a identificar y corregir brechas, así como derribar paradigmas propios de una industria que en general es resistente al cambio.

Como ámbitos de acción futuros surgen de inmediato la operación remota de equipos mineros, y luego la operación autónoma en los casos que corresponda, aprovechando de esta forma el despegue de las tecnologías de la información y abandonando tareas y prácticas prescindibles en pleno siglo XXI, para continuar sumándose a la nueva forma de hacer minería.

## **DEDICATORIA**

A las trabajadoras y trabajadores del cobre, en especial a quienes día a día, noche a noche, nos ayudan a engrandecer a nuestro país.

Porque su aporte es invaluable y fundamental, lo mínimo que podemos hacer en retribución a su esfuerzo y valentía es todo, y no menos que todo, lo que esté a nuestro alcance, para resguardar su vida e integridad, y con ello dar mayor tranquilidad a sus familias.

Con este gran y trascendente foco se desarrolló el presente trabajo, que a la vez permea sus beneficios hacia otros ejes relevantes del negocio, como son la productividad y la optimización de los costos, apuntando con ello hacia una minería más segura y competitiva.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi familia, Anita y Cristóbal, que han sabido comprender lo demandante que es estudiar lejos de casa y restar tiempo familiar a los fines de semana, brindando un soporte fundamental para el logro de la meta después de dos largos años de programa, y también un oportuno beso y/o abrazo en los momentos en que el camino se hacía más difícil. También a Joaquín, el próximo integrante del equipo, que en su proceso de desarrollo fue una motivación adicional para seguir adelante, a quién pronto podré abrazar por primera vez con la satisfacción de haber concluido una etapa, y devolverle cada minuto que no le pude entregar durante su gestación.

A mis padres y hermanos, que han entendido empáticamente que los viajes al sur de fin de semana y reencuentros familiares, muchas veces tuvieron que ser reemplazados por viajes a la Universidad. También por ser quienes, desde un comienzo, forjaron en mí el interés por aprender y progresar, la ambición de plantearme metas desafiantes y no rendirme hasta cumplir el objetivo.

A la Universidad de Chile, por brindar un Magíster a la altura de las expectativas, tanto por el nivel de los profesores, como por la conceptualización y lógica que hay detrás del programa, con curso de especialización incluido. También por la exigencia que se pudo palpar durante estos dos años y que, si bien generó muchas veces agotamiento y estrés, es parte de lo que se espera de la principal casa de estudios de este país. Al equipo administrativo y staff del programa, que nos apoyaron en todo momento facilitando el proceso del programa desde su inicio. A los profesores Enrique Jofré y Gerardo Díaz, quienes nos condujeron, en una lucha permanente y no exenta de complicaciones, a llevar a término esta etapa final pero fundamental del programa. Sin su apoyo y control permanente finalizar este trabajo hubiese sido más difícil.

A la División Radomiro Tomic, por darme la oportunidad de aportar con el desarrollo de este trabajo, otorgando las facilidades para desarrollar este proyecto, así como el apoyo en su evaluación y en el inicio de las gestiones para su futura implementación.

A mis compañeros, con quienes pudimos establecer lazos tanto profesionales como personales, generando una red de apoyo muy potente durante el desarrollo del MBA, que sin duda permanecerá en el tiempo.

## TABLA DE CONTENIDO

Índice de Tablas .....	v
Índice de Ilustraciones.....	vi
1. Introducción .....	1
Contexto del problema.....	1
Alcances.....	3
Objetivos.....	3
Objetivo General .....	3
Objetivo Específicos .....	3
Marco Conceptual.....	4
Metodología .....	6
2. Contexto Estratégico de RT: Hacia la explotación de sulfuros.....	7
Estrategia de la División .....	8
Contexto de Largo Plazo.....	10
3. Levantamiento Condición Actual.....	12
4. Mapeo de stakeholders .....	19
5. Benchmarking y aplicaciones similares de Demarcación Virtual.....	19
6. Aplicabilidad en Radomiro Tomic .....	20
7. Evaluación Económica del Proyecto.....	24
Costos del Proyecto .....	24
Beneficios directos del Proyecto.....	25
Beneficios del Proyecto considerando el aumento de productividad .....	26
Evaluación del potencial Impacto Económico de accidente asociado a actividad actual.....	29
8. Plan de Implementación Sistema de Demarcación Virtual.....	31
Análisis de Riesgos .....	31
Programa de Pilotaje.....	32
Programa de Implementación .....	33
Estrategia de Gestión del Cambio.....	35
Campos Futuros de Desarrollo .....	35
9. Conclusiones .....	37
10. Bibliografía.....	39
11. Anexos.....	41
Anexo A.....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos estratégicos DRT.....	10
Tabla 2. Cálculo estacas a instalar en función de los metros lineales de cierre PND 2018, quinquenio 2018-2022.....	16
Tabla 3. Detención no programada a causa de falta de demarcación, respecto a horas nominales	18
Tabla 4. Costos implementación y mantenimiento del sistema de posicionamiento.....	25
Tabla 5. Flujo costos y ahorros.....	26
Tabla 6. Cálculo costo de detención por falta de demarcación. ....	27
Tabla 7. Flujo de Caja y estimación $\Delta$ VAN, caso base.....	28
Tabla 8. Flujo de Caja y estimación $\Delta$ VAN, análisis de sensibilidad. ....	28
Tabla 9. Estimación producción diaria media. ....	30
Tabla 10. Resumen de pruebas de validación del funcionamiento del sistema.....	33

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Demarcación actual de perforación de control pared. ....	2
Ilustración 2. Jerarquía de control de riesgos. ....	4
Ilustración 3. Productividad asociada a saltos tecnológicos (CODELCO, 2015). ....	5
Ilustración 4. Productividad per cápita versus desarrollo digital (Fundación Chile, 2016). ....	5
Ilustración 5. Estructura de las iniciativas de transformación digital. ....	6
Ilustración 6. Productividad Minería del Cobre en Chile. Base 2000=100 (CNP, 2017, con datos de COCHILCO). ....	8
Ilustración 7. Mapa estratégico División Radomiro Tomic. ....	9
Ilustración 8. Comparación geométrica Pit Final 2017 y Pit Final PND 2018 (año 2057). ....	11
Ilustración 9. Evolución Distancias de Transporte - PND 2018. ....	12
Ilustración 10. Organigrama área Geomensura contrato actual. ....	13
Ilustración 11. Sistema de levantamiento móvil implementado. ....	14
Ilustración 12. Sistema de transporte de estacas en terreno. ....	14
Ilustración 13. Demarcación de quebradura y construcción de zanja de control. ....	15
Ilustración 14. Esquema de perforación tradicional. Precortes y buffer se demarcan con estacas. ....	15
Ilustración 15. Ejemplo de Reporte de Estado por Equipo. ....	17
Ilustración 16. Ejemplo de filtro por espera de demarcación. ....	17
Ilustración 17. Horas de detención no programada asociadas a ausencia de demarcación. ....	18
Ilustración 18. Tecnología relacionada, sistema Terrain de Finning. ....	20
Ilustración 19. Tecnología de navegación, perforadoras SMARTROC D65 de Atlas Copco. ....	20
Ilustración 20. Matriz Impacto v/s Dificultad de Implementación, iniciativas. ....	21
Ilustración 21. Ámbitos de la innovación en la Industria Minera (Carmona, 2017). ....	22
Ilustración 22. Esquema propuesto de habilitación de perforadoras (Jigsaw Technologies, 2018). ....	23
Ilustración 23. Monitor y visualización en cabina de demarcaciones virtuales para perforación. ....	24
Ilustración 24. Programa prueba piloto (Jigsaw Technologies, 2018). ....	32
Ilustración 25. Secuencia de implementación del proyecto. ....	33
Ilustración 26. Ciclo de Deming, estrategia de mejora continua. ....	34
Ilustración 27. Sistema de operación remota BENCH REMOTE, Atlas Copco. ....	36

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria minera del cobre atravesó hace poco una coyuntura de precios que ha obligado a las empresas productoras a redoblar esfuerzos para seguir siendo competitivas, lo que en un mercado de *commodities* se ha enfocado principalmente en mejorar la productividad, y reducir los costos. Por otro lado, la seguridad de los trabajadores continúa siendo un eje principal de todas las compañías del rubro, privadas o públicas, y se espera que esto continúe siendo así, o aumentando en el tiempo.

Bajo este escenario, un proyecto que ofrezca reducir la exposición de trabajadores a los riesgos inherentes al entorno minero, mejorar la productividad mediante la automatización e incorporación de tecnología, y reducir costos; asoma como una alternativa atractiva de negocio, merecedora de ser revisada y evaluada, que es lo que se hará en el presente trabajo.

El proyecto a estudiar consiste en la implementación de tecnología, existente y/o innovadora, para reemplazar actividades que hoy son intensivas en mano de obra e implican un riesgo no eliminable para los trabajadores. Específicamente hace referencia a diferentes demarcaciones topográficas que se instalan en terreno, que podrían eliminarse, si se implementa otro tipo de referencia para los equipos que demandan esas marcaciones. Esta solución, además de reducir la exposición de los trabajadores, aumentaría la productividad al eliminarse tiempos de espera de marcas, y reduciría costos al eliminar un subproceso.

En esta oportunidad, se analizará el caso de la demarcación topográfica que se realiza en el rajo de la División Radomiro Tomic de Codelco, no obstante, este análisis sea válido para gran parte de las faenas mineras a cielo abierto.

### **Contexto del problema**

La demarcación y replanteo de puntos de terreno en áreas de faenas mineras alejadas, de difícil acceso, muy cercana a los taludes o al tránsito de equipos, puede afectar la seguridad de los trabajadores (topógrafos, ayudantes, etc.) o implicar costos y tiempos de desplazamiento y acceso no despreciables.

Actualmente, en Radomiro Tomic este proceso es llevado a cabo por dos cuadrillas de trabajadores que llega al punto de trabajo en una camioneta, con la línea o malla a demarcar cargada en sus equipos topográficos, y a continuación proceden a ubicar las referencias físicas desplazándose a pie y estacando manualmente sobre el terreno.

Ejemplos de estas demarcaciones son, estacas de límite de carguío le servirán de guía visual al operador de la excavadora que excavará una zanja siguiendo la línea imaginaria que se forma al conectar las estacas; o bien, marcas de perforación, que servirán de referencia a perforadoras de control pared para cada pozo a perforar (Ilustración 1).



*Ilustración 1. Demarcación actual de perforación de control pared.*

Día a día, se requiere demarcar en terreno una multiplicidad de indicaciones, teniendo incluso que definirse un protocolo de demarcación para poder identificar unas de otras. Gran parte de las demarcaciones tienen una vida útil muy reducida, ya que sólo sirven de referencia para realizar un trabajo con maquinaria, y tras ello se pierden o desechan.

En ocasiones, acceder con personal al punto topográfico que se requiere demarcar, puede significar un riesgo muy difícil de eliminar. Por otro lado, la mayoría de las veces, los tiempos de desplazamiento no son despreciables, siendo muchas veces mayores los tiempos de traslado que el mismo proceso de demarcación.

En algunos casos, la demarcación es muy intensiva, lo que implica disponer de recursos adicionales para ello. Por ejemplo, la demarcación de pozos para perforación, en que se debe estacar cada uno de los pozos diseñados, de modo que la perforadora de control pared se posicione sobre él e inicie el proceso.

Además, considerando que la operación minera es continua, se debe tener presente que las demarcaciones físicas, son menos visibles en turnos nocturnos, y fácilmente se pueden perder como consecuencia de actividades propias de otras operaciones mineras en el área. Es por esto que no depender de ellas, otorgaría una mayor confiabilidad al proceso posterior que se requiere realizar.

Todo lo expuesto, y otras consideraciones que serán abordadas con mayor profundidad más adelante, hacen que el reducir al mínimo la cantidad de demarcaciones físicas sea atractivo, apalancando de esta forma mejoras en seguridad, productividad y costos.

## **Alcances**

El presente trabajo busca hacerse cargo de:

- Identificar y definir los beneficios esperados de esta implementación. Para ello se deben recoger los intereses y prioridades de las diferentes áreas involucradas.
- Evaluar Factibilidad Técnica de posibles soluciones para reemplazar demarcaciones topográficas físicas por alguna aplicación tecnológica que optimice el proceso.
- Evaluación cualitativa y cuantitativa de los beneficios de implementar la tecnología seleccionada. Esto incluye análisis económico del proyecto, incluyendo costos y beneficios.
- Generar plan propuesto de implementación, definiendo plazos e hitos relevantes.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar y evaluar un sistema que permita optimizar procesos mineros que hoy requieren de un subproceso intermedio: demarcación topográfica temporal. Eliminando este subproceso y reemplazándolo por un sistema de demarcación virtual, que apunte a mejorar en tres aspectos críticos en la industria minera, y también en División Radomiro Tomic: Seguridad de las personas, productividad y reducción de costos.

### **Objetivo Específicos**

- Recoger e incorporar durante todo el proceso las necesidades y visión de los *stakeholders* claves en el proceso.
- Identificar qué tipo de marcaciones topográficas físicas debiesen eliminarse, y cuáles no. Luego describir alternativa tecnológica seleccionada para reemplazar las demarcaciones topográficas físicas por demarcaciones virtuales.
- Cuantificar los costos de implementar esta solución, y luego valorizar tanto los beneficios económicos directos, para obtener el  $\Delta$ VAN del proyecto, con relación al caso base, que es la situación actual; como el beneficio que otorga el proyecto en términos de mejora de productividad, tanto en términos reales como estadísticos.
- Definir, en conjunto con los *stakeholders*, un plan de implementación, el que al menos debiese contar con prueba piloto de la solución definida.

## Marco Conceptual

Es importante destacar que en Seguridad se manejan diferentes jerarquías de control de riesgos, donde los más básicos y menos efectivos son el uso de elementos de protección personal, o la señalética de advertencia de peligro; y los más deseables son la sustitución, o la eliminación del peligro. Esto se representa gráficamente a través de una pirámide (Ilustración 2), en que los controles situados más cerca de la cúspide son los más efectivos y por ello los deseables.

La iniciativa propuesta es altamente efectiva en términos de gestión de seguridad, ya que apunta a la más alta jerarquía de control de riesgos, es decir, a eliminar la condición, al dejar de exponer al trabajador a la fuente de peligro.



*Ilustración 2. Jerarquía de control de riesgos.*

Al estudiar la productividad de las industrias, se puede observar que grandes saltos tecnológicos generan nuevos estadios de eficiencia (Ilustración 3). Es así como hacia fines de la primera mitad del siglo XX, la mecanización de la producción generó un quiebre en la tendencia a la fecha. Luego fue el control centralizado, de la mano de la informática y las comunicaciones el que generó un nuevo y superior estadio. En la actualidad, donde vivimos una realidad distinta a la del siglo XX, en que las operaciones son cada vez más complejas, las exigencias medioambientales y comunitarias son cada vez mayores, y se exigen altos estándares de seguridad y salud ocupacional, se apunta a la Gestión Integrada de Operaciones como una vía factible de gatillar un nuevo salto en productividad. Esta visión sistémica de la organización, además de promover un trabajo coordinado y colaborativo entre las áreas, nos exige tener a disposición y en tiempo real la información requerida, para facilitar la toma de decisiones o la ejecución eficiente de las tareas. En este punto es que la implementación propuesta coincide con los pilares de la Operación Integrada, en que la tecnología y la automatización ocupan posiciones privilegiadas.

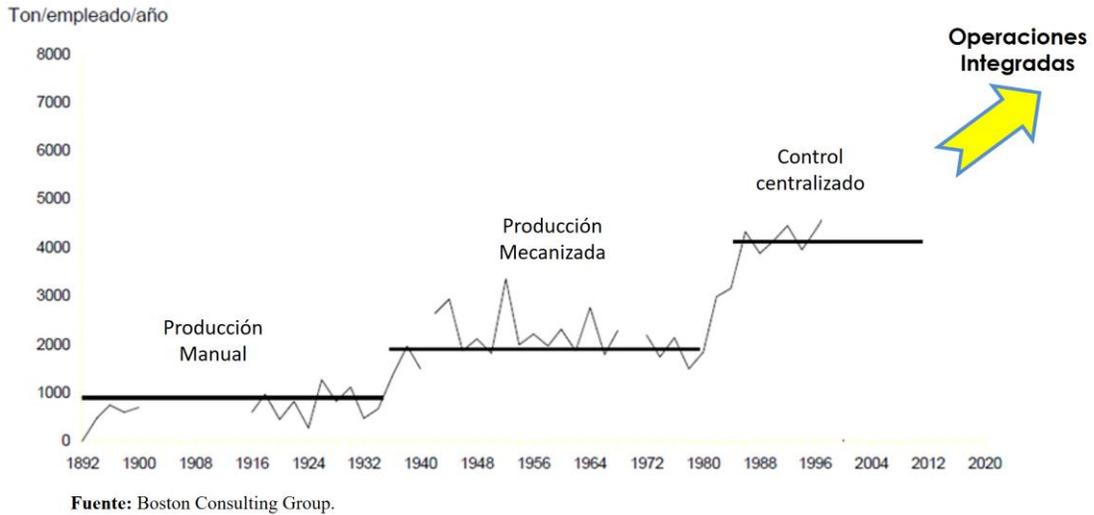


Ilustración 3. Productividad asociada a saltos tecnológicos (CODELCO, 2015).

Este vínculo entre nivel de desarrollo tecnológico/digital y productividad es reconocido por la industria minera, y mirado como una alternativa para seguir siendo competitivo. De acuerdo a lo observado en la Ilustración 4, presentada en el Roadmap Tecnológico 2015-2035: Desde el cobre a la Innovación, la productividad de los países está estrechamente relacionada a su desarrollo digital, donde Chile presenta resultados de regulares a bajos, mientras que los países más productivos son aquellos con mayor grado de digitalización en sus procesos. Luego, se entiende que la productividad seguiría de cerca esta revolución digital, apalancando así la competitividad en un mercado de *commodities*, donde la forma de competir es haciendo los proceso cada vez más eficientes.

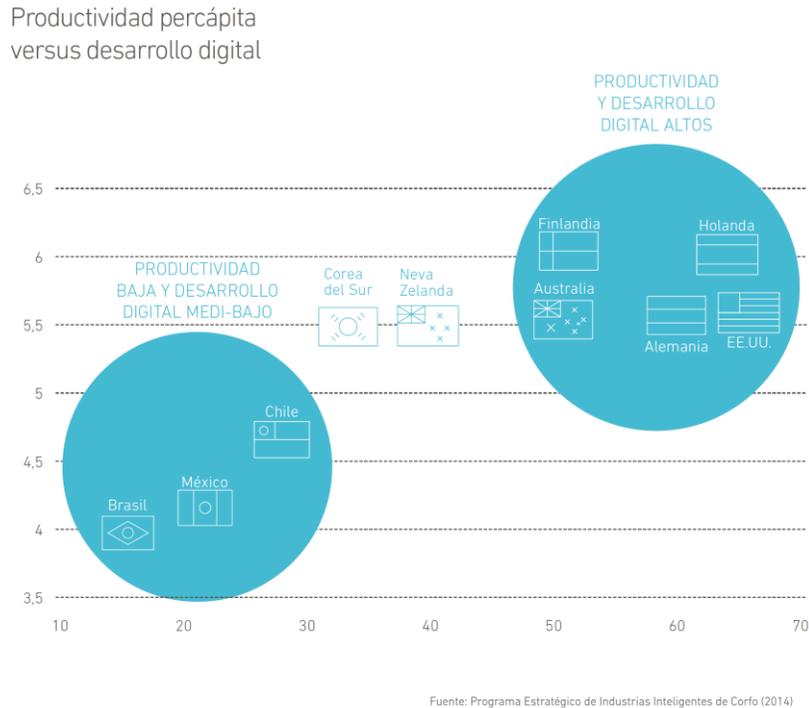
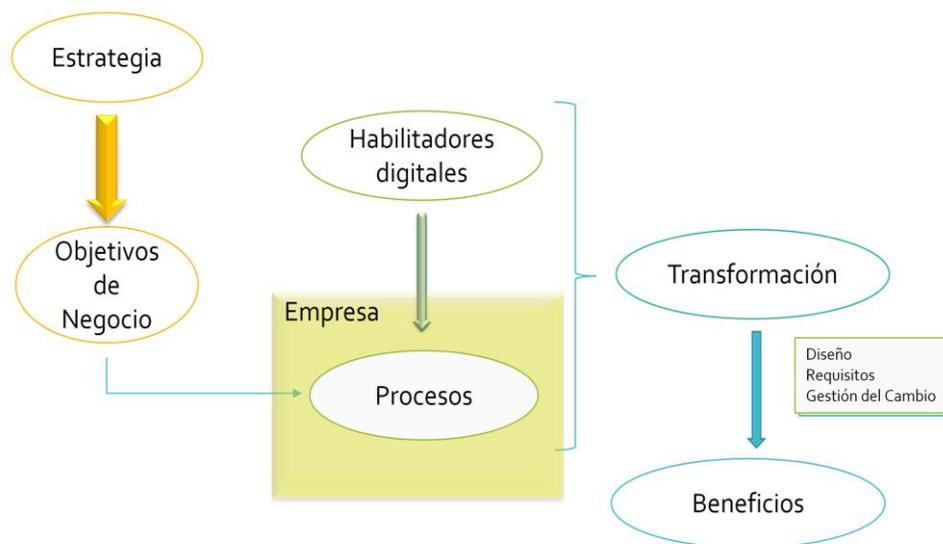


Ilustración 4. Productividad percápita versus desarrollo digital (Fundación Chile, 2016).

No obstante, saltos tecnológicos no se dan de forma espontánea, ni tampoco sencilla. La Transformación Digital se define como un cambio organizacional, gatillado por las nuevas tecnologías digitales y nuevos modelos de negocio, para aumentar la *performance*. En la Ilustración 5 se presenta un esquema de cómo una iniciativa de transformación digital opera en la empresa, en que es clave que los esfuerzos apunten a la estrategia y los objetivos del negocio, y que existan los llamados habilitadores digitales, a cargo de impulsar la mejora hasta lograr la transformación, que debe contar con un proceso de gestión del cambio acorde a la organización y a las partes interesadas.



*Ilustración 5. Estructura de las iniciativas de transformación digital.*

## Metodología

Para dar respuesta a los objetivos planteados, el trabajo se dividió en cuatro grandes procesos, que se pueden definir como:

1. Catastro de necesidades y preferencias de *stakeholders* claves

Mediante un proceso de sensibilización y difusión de la iniciativa, se deben recoger las inquietudes y sugerencias de los ejecutores y usuarios del proceso estudiado.

Es relevante destacar que esta interacción se debe mantener a lo largo de todo el proceso, logrando un involucramiento estrecho de todos aquellos actores que participarán directamente, o se verán afectados por la implementación de esta iniciativa. Para ello se generarán talleres periódicos de seguimiento y retroalimentación, donde la participación de los operadores será clave para poder alinear la solución propuesta con los requerimientos del usuario final.

2. Factibilidad Técnica, definición de alternativas

En esta etapa se debe completar el Benchmarking, de modo de detectar oportunidades en implementaciones similares que puedan existir en la industria o en otros sectores productivos.

Se realizará una investigación de alternativas técnicas para implementar la solución requerida., que al menos considerará la consulta a proveedores de tecnología internos y externos de la División, la concertación de presentaciones de potenciales proveedores, y definición de requerimientos técnicos y plazos estimados de implementación.

Como se adelantó en las secciones anteriores, y al tratarse de diferentes tipos de demarcaciones que se busca eliminar, se espera converger en una solución mixta, combinando tecnologías existentes, con desarrollos innovadores en base a la adaptación de tecnologías similares.

### 3. Evaluación Económica y de Beneficios del Proyecto

Parte relevante de la evaluación económica, será la estimación de costos de implementación, y la evaluación de los potenciales ahorros que generaría el Proyecto. Se esperan tanto ahorros directos (materiales, mano de obra, etc.), como ahorros producto del aumento de productividad, al hacer el proceso de forma más eficiente. Además, se deben evaluar otros beneficios no cuantificables económicamente, como será la menor exposición al riesgo, al prescindir de trabajos en áreas propensas a riesgos difíciles o imposibles de eliminar.

### 4. Plan de Implementación

Finalmente, una vez validada la factibilidad del proyecto, se elaborará un plan tentativo de implementación y puesta en marcha, definiendo plazos acordes al cambio tecnológico a impulsar. Este plan, ineludiblemente debe considerar una etapa de pilotaje, y una estrategia para la adecuada gestión del cambio.

## 2. CONTEXTO ESTRATÉGICO DE RT: HACIA LA EXPLOTACIÓN DE SULFUROS

La División Radomiro Tomic, en línea con la Corporación, define como su principal valor, el valor número 1 de su carta de valores:

*El respeto a la vida y la dignidad de las personas*

Otro valor relevante para CODELCO considerada dentro de esta carta, como sexto valor es,

*La innovación*

Si a esto se suma dentro de los pilares estratégicos del negocio asoma la **productividad** como una forma de mantener a CODELCO como una empresa competitiva en el mercado, entonces soluciones que permitan a través de la **automatización de procesos**, disminuir la exposición de los trabajadores, y a la vez optimizar etapas del proceso productivo, se enmarcan plenamente en

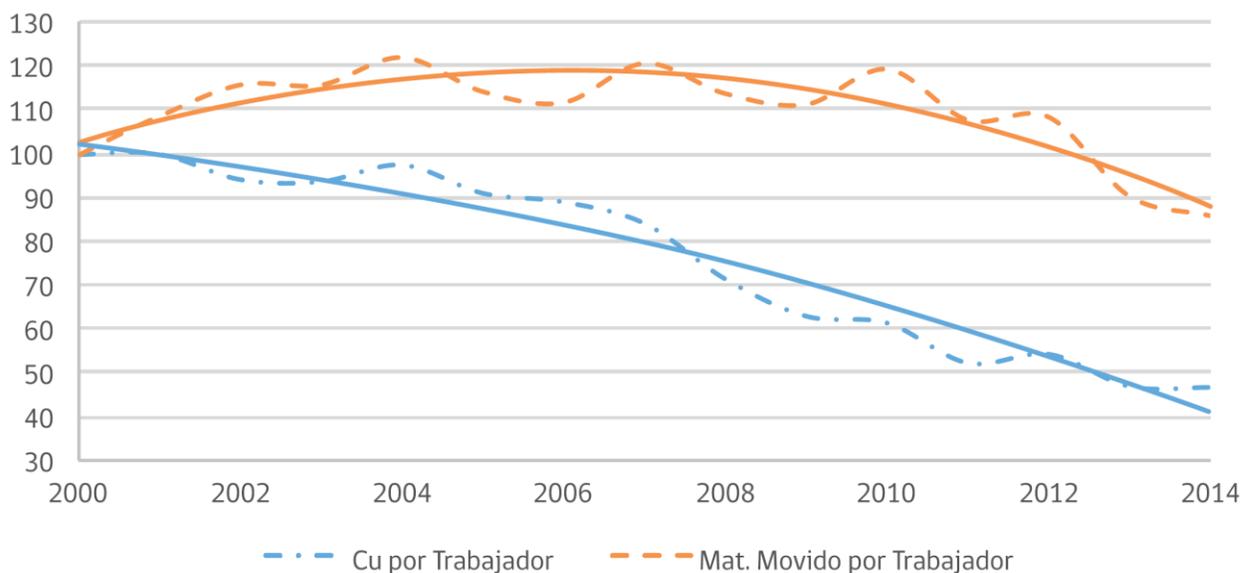
los objetivos de la compañía, que en general son compartidos por la industria, lo que eventualmente daría la opción de homologarlas en otras faenas minera similares.

### Estrategia de la División

Radomiro Tomic, como División de CODELCO se enmarca dentro de la gran minería del cobre, industria en que Chile tiene el liderazgo mundial en términos de producción, con una participación en torno al 30%. Así también, Chile es por lejos el país con más reservas de cobre en el mundo.

Sin embargo, en términos de productividad la minería del cobre en Chile está lejos de ser líder. El informe Productividad en la Gran Minería del Cobre, publicado el año 2017 por la Comisión Nacional de Productividad (CNP), da cuenta de cómo la productividad tanto en términos de cobre producido por trabajador, como de material movido por trabajador, mantuvo una tendencia descendente en los últimos años (ver Ilustración 6).

El primer indicador, cobre por trabajador, puede explicar su tendencia más acentuada y descendente desde el inicio del gráfico, por factores propios de los yacimientos chilenos y su envejecimiento, como la disminución de las leyes, la mayor dureza del mineral, y el incremento de las distancias de transporte, por lo que es en parte esperable. Por otro lado, la tasa de material movido por trabajador, está menos afectado por estos factores geo-minero-metalúrgicos, y es mucho más sensible al desempeño propio de los trabajadores y a la forma de hacer las cosas.



*Ilustración 6. Productividad Minería del Cobre en Chile. Base 2000=100 (CNP, 2017, con datos de COCHILCO).*

La citada Ilustración 6 muestra que independiente de cómo se mida, la productividad de la minería del cobre en Chile ha disminuido durante la última década, en un contexto donde asoman competidores que dada la juventud de sus yacimientos, o a otras ventajas competitivas que bien

pueden estar ligadas a un mayor desarrollo digital, son más eficientes en sus procesos y pueden lograr menores costos de producción, que es finalmente lo que diferencia a las empresas más competitivas.

Radomiro Tomic, alineado con la estrategia corporativa, ha definido un mapa estratégico, que sirve como hilo conductor para el accionar de la División en el periodo 2017-2020 (Ilustración 7). Este mapa se compone de tres grandes etapas, que comienzan con un proceso de consolidación y optimización de la condición actual, para luego generar quiebres y romper paradigmas, propios o comunes a la industria, y finalmente, hacia el 2020 lograr posicionarse como una empresa altamente competitiva y de excelencia.

Para lograr sus desafíos a mediano y largo plazo, Radomiro Tomic ha definido 14 objetivos estratégicos, en los cuales se requiere poner foco para mantener la competitividad y sustentabilidad de la División. Estos objetivos son necesarios para apalancar el mapa trazado, y lograr los objetivos trazados al año 2020.

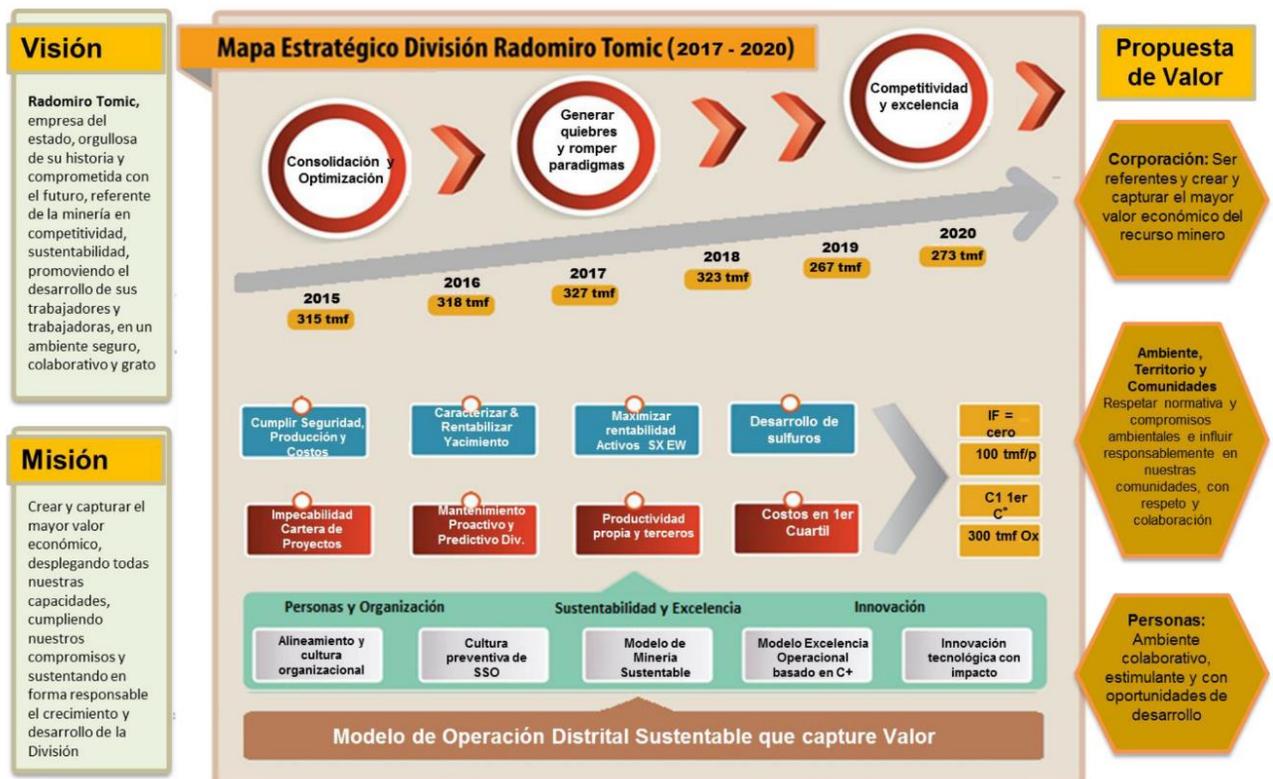


Ilustración 7. Mapa estratégico División Radomiro Tomic.

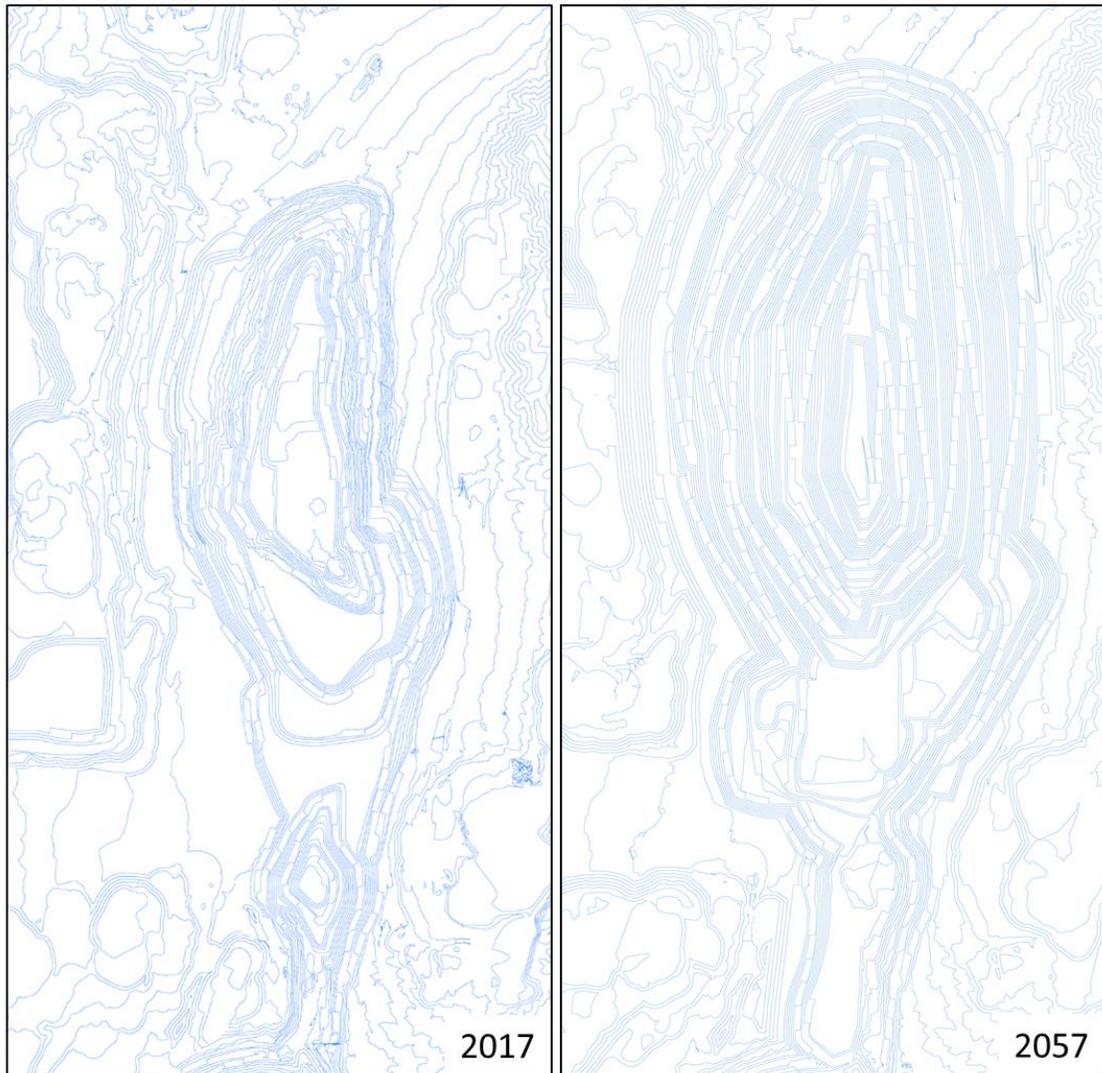
Esta iniciativa en particular, si bien a simple vista puede parecer muy acotada, pretende aportar directamente a los objetivos número 1, 3, 4, 7, 8 y 11, enumerados en la Tabla 1.

<b>N°</b>	<b>OBJETIVOS ESTRATÉGICOS</b>
<b>1</b>	<b>Cumplir compromisos Seguridad, Producción y Costos</b>
2	Impecabilidad Cartera de Proyectos
<b>3</b>	<b>Innovación tecnológica con impacto</b>
<b>4</b>	<b>Desarrollo de Sulfuros</b>
5	Modelo de Gestión Excelencia Operacional basado en C+
6	Maximizar rentabilidad Activos Hidro SX EW
<b>7</b>	<b>Costos en 1er Cuartil</b>
<b>8</b>	<b>Productividad de propia y terceros</b>
9	Caracterizar & Rentabilizar Yacimiento
10	Modelo de Minería Sustentable
<b>11</b>	<b>Cultura Preventiva de Seguridad y Salud Ocupacional</b>
12	Alineamiento y cultura organizacional
13	Mantenimiento Proactivo y Predictivo
14	Modelo de Operación Distrital Sustentable que capture Valor

*Tabla 1. Objetivos estratégicos DRT*

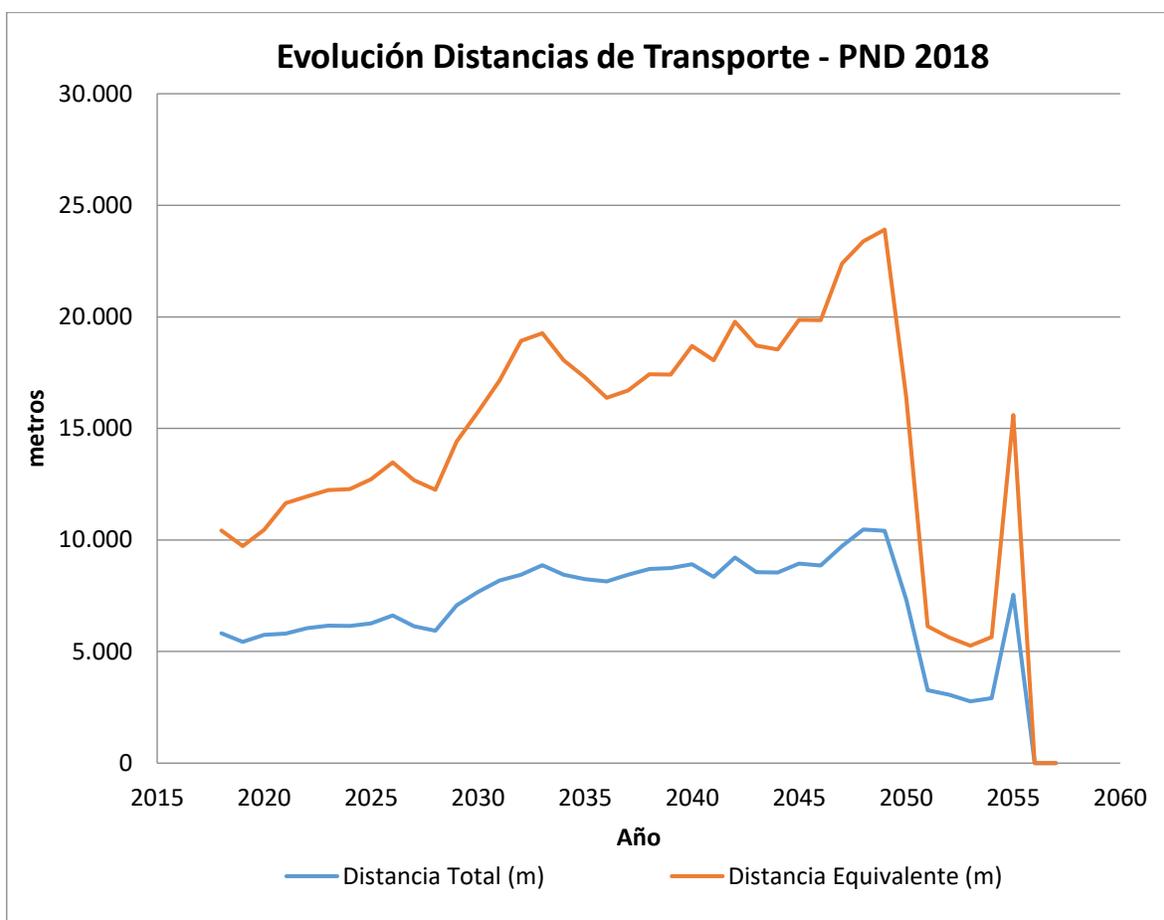
### **Contexto de Largo Plazo**

Esta condición, que hoy se identifica como necesidad, cobra una mayor relevancia al hacer el análisis de largo plazo. Radomiro Tomic cuenta con importantes reservas de minerales sulfurados, que de explotarse extienden la vida del rajo fácilmente por sobre el año 2050 (Ilustración 8), ya sea mediante la concreción del Proyecto RT Sulfuros Fase II, o bien mediante estrategias alternativas de procesamiento como podría ser la lixiviación de sulfuros, actualmente en estudio.



*Ilustración 8. Comparación geométrica Pit Final 2017 y Pit Final PND 2018 (año 2057).*

En términos geométricos, el rajo pasará de tener una profundidad de 400 metros aproximadamente, a poco menos de 1 kilómetro a las fases más profundas. Evidentemente, el crecimiento y profundización del rajo implica un incremento en las distancias de transporte, que no sólo afectará directamente al transporte de mineral como operación unitaria, sino que también en los tiempos de traslado de todos los servicios asociados a la operación. De esta forma, el personal que está encargado de instalar demarcaciones físicas en terreno requerirá más tiempo para desplazarse de una fase a otra, y luego, si se busca mantener una performance similar a la actual, sin cambiar la metodología, se necesitará aumentar la dotación de personas y recursos destinados para tal actividad. Esto se verifica revisando la evolución de las distancias medias (total y equivalente) que considera el plan de largo plazo PND 2018 (ver Ilustración 9).



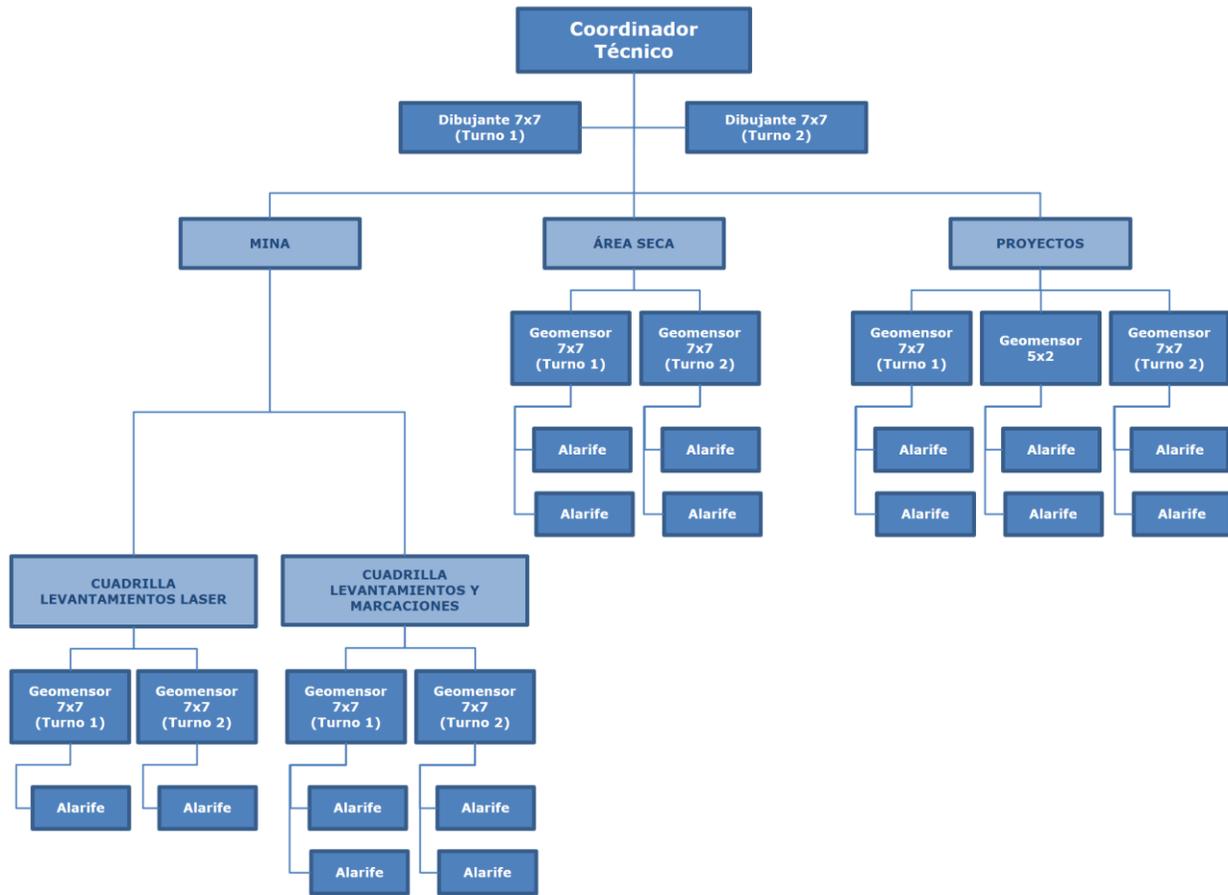
*Ilustración 9. Evolución Distancias de Transporte - PND 2018.*

Se aprecia que entre los años 2018 y 2049, en que la mina continúa profundizándose, la distancia total media aumenta de los 5,8 km a los 10,4 km, prácticamente duplicándose. Mayor es la diferencia si se considera la distancia equivalente, parámetro que se hace cargo del efecto de las pendientes en los tiempos de traslado, componente que a pesar de que es más relevante en el caso de los camiones de extracción (CAEX), también influye en los traslados de vehículos menores.

### 3. LEVANTAMIENTO CONDICIÓN ACTUAL

Actualmente las actividades de demarcación topográfica son realizadas por un servicio de terceros, que a partir de septiembre de 2017 se adjudicó un contrato por 48 meses, con un presupuesto cercano a los 11 US\$ millones, dando continuidad al servicio anterior, contrato que es administrado por la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD). Este contrato contempla dos áreas principales: Geomensura y Geotecnia, con una dotación total de 53 personas, donde el área de geomensura considera una mayor dotación, con 28 personas.

El área de Geomensura presta servicios topográficos de forma transversal a toda la División, con gran parte de sus cuadrillas en turno 7x7, las que se desempeñan solamente de día. El organigrama del área esta área se presenta en la Ilustración 10.



*Ilustración 10. Organigrama área Geomensura contrato actual.*

Observando la ilustración anterior, se aprecia una innovación del recientemente iniciado contrato, impulsada por la GRMD, específicamente por las áreas de Geotecnia y Gestión de la Producción antes de licitar el nuevo servicio. En el área mina se incorporó tecnología para las actividades de levantamiento, permitiendo reducir la exposición de los trabajadores, aumentar la productividad, y reducir costos y dotación. Se adquirió un escáner láser I Site Drive, de Maptek (Ilustración 11), que permite actualizar el avance mina en movimiento, desde dentro de una camioneta. Es por ello, que al reducirse las actividades de terreno se pudo reducir el número de alarifes de esas cuadrillas en particular.



*Ilustración 11. Sistema de levantamiento móvil implementado.*

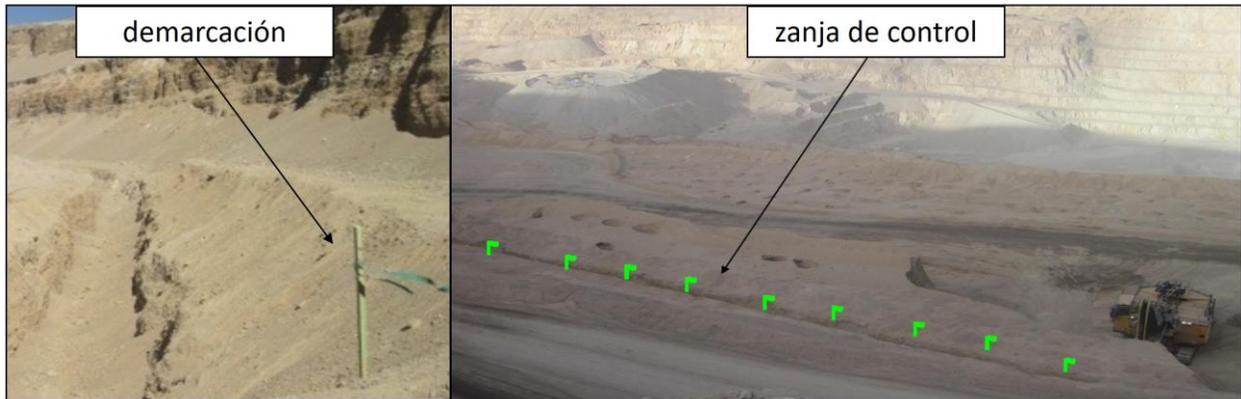
Sin embargo, las actividades de replanteo o demarcación de momento se realizan en forma tradicional, es decir, posicionando referencias físicas en terreno, que instalan las cuadrillas de geomensura utilizando estacas de madera. En la mayoría de las ocasiones, por las condiciones del terreno, se requiere generar la hendidura con una cuña de acero antes de clavar la estaca de madera, siendo ambas operaciones realizadas con una maceta.



*Ilustración 12. Sistema de transporte de estacas en terreno.*

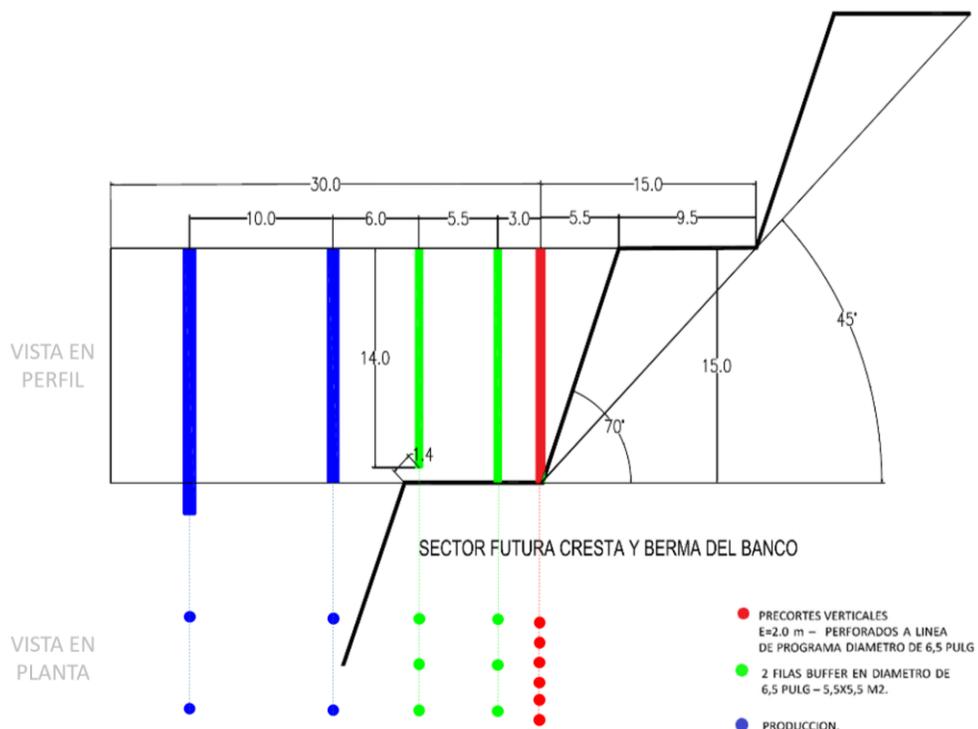
Las estacas utilizadas son de diferentes dimensiones, pero para efectos de este trabajo nos enfocaremos en demarcaciones de quebradura, que se hacen con estacones de 1,5 m (Ilustración 12), y demarcaciones para perforación de control pared, en las cuales se utilizan estacas cortas, de 25 cm. Las demarcaciones de quebradura se instalan cada 10 m y el objetivo principal es

representar una línea sobre la cual posteriormente se debe excavar una zanja de control, como referencia de la cresta del banco a construir (Ilustración 13).



*Ilustración 13. Demarcación de quebradura y construcción de zanja de control.*

En el caso de la demarcación para perforación de control pared, lo que se realiza es poner una estaca por cada pozo a perforar en el cierre, esto es, línea de precortes y dos líneas buffer (Ilustración 14). Los pozos de producción no se demarcan ya que las perforadoras de diámetro mayor están equipadas con sistema de navegación GPS. La actividad de instalación de demarcaciones para perforación es probablemente la más demandante en tiempo del servicio, y a la vez en muchas ocasiones se requiere reprocesar cuando por alguna condición operacional las marcas son eliminadas antes de perforar.



*Ilustración 14. Esquema de perforación tradicional. Precortes y buffer se demarcan con estacas.*

Como referencia, de acuerdo al plan de largo plazo vigente (PND 2018), el año 2018 se realizarán 49.684 metros lineales de cierre de banco, lo que significa que en esa misma cantidad de metros lineales se deben instalar demarcaciones de precorte y buffer para perforar, y estacones de quebradura una vez tronado. Realizando un cálculo simple y pasando por alto algunas consideraciones operativas, se puede obtener una estimación del número de estacas a instalar durante el año en función de los espaciamientos entre estacas y los metros lineales de cierre programados. El detalle, tanto del año 2018 como de todos los años del primer quinquenio se presenta en la Tabla 2.

	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Metros lineales de cierre</b>	<b>49.684</b>	<b>43.489</b>	<b>43.691</b>	<b>44.233</b>	<b>53.710</b>
Precortes					
<i>cada 2,0 m</i>	24.842	21.745	21.846	22.117	26.855
Pozos buffer					
<i>cada 5,5 m Fila 1</i>	9.033	7.907	7.944	8.042	9.765
<i>cada 5,5 m Fila 2</i>	9.033	7.907	7.944	8.042	9.765
<b>Total estacas perforación</b>	<b>42.909</b>	<b>37.559</b>	<b>37.733</b>	<b>38.201</b>	<b>46.386</b>
Estacones quebradura					
<i>cada 10 m</i>	4.968	4.349	4.369	4.423	5.371
<b>Total estacas de quebradura</b>	<b>4.968</b>	<b>4.349</b>	<b>4.369</b>	<b>4.423</b>	<b>5.371</b>
<b>TOTAL ESTACAS</b>	<b>47.877</b>	<b>41.908</b>	<b>42.102</b>	<b>42.625</b>	<b>51.757</b>

*Tabla 2. Cálculo estacas a instalar en función de los metros lineales de cierre PND 2018, quinquenio 2018-2022*

Luego, tomando el año 2018 como referencia, en que se proyectan 47.877 demarcaciones a instalar, sólo por concepto de perforación y quebradura, y considerando que las demarcaciones se instalan de forma relativamente distribuida, se obtiene un promedio de más de 130 estacas diarias. A esto se deben sumar todas las otras demarcaciones que se realizan en terreno, muchas de ellas no sistematizables por lo que no se consideran en esta oportunidad; además se deben agregar los reprocesos, cada vez que se pierden demarcaciones o se modifica algún parámetro del diseño que implique modificar las referencias.

Por último, es relevante comentar que las cuadrillas de geomensura se trasladan en camioneta a los diferentes puntos, transportando ellos mismos su equipamiento y las estacas a instalar.

Por otro lado, la actividad de demarcación tiene un impacto en las operaciones unitarias sucesivas, como por ejemplo en la perforación. La demarcación de pozos a perforar, en el caso de *buffer* y precorte es prerequisite para la operación del equipo de perforación, por ende, la ausencia de las demarcaciones implicará una demarcación no programada del equipo. Esto se monitorea mediante el sistema de control operacional en línea que se utiliza en la División, y mediante éste es posible conocer la causa de las detenciones y su duración.



### Estado por Equipo

Fecha Inicial : 1/1/2017 A Fecha Final : 31/1/2017 B  
 Tipo de Equipo : Todo Flota : SMART-ROC  
 Estado : Todo Código : Todo

Equipo	Fecha - Hora Inici	Fecha Hora Final	Duracion	Codig	Categoria	Descripcion	Comentario
R06	01/01/2017 08:00:00	01/01/2017 11:18:55	3:18:55	8 D.Noprg		TRONADURA	""
	01/01/2017 11:18:55	01/01/2017 11:42:12	0:23:17	50 D.Noprg		TRASLADO DE PERFORADORA	""
	01/01/2017 11:42:12	01/01/2017 13:18:39	1:36:27	1 Efectivo		PRODUCCION	""
	01/01/2017 13:18:39	01/01/2017 14:48:47	1:30:8	2 D.Prg		COLACION	""
	01/01/2017 14:48:47	01/01/2017 15:53:50	1:5.3	1 Reserva		SIN OPERADOR	Tiempo de Colacion Expirado
	01/01/2017 15:53:50	01/01/2017 16:33:44	0:39:54	1 Efectivo		PRODUCCION	""
	01/01/2017 16:33:44	01/01/2017 20:35:38	4:1:54	8 Sin Tiempo		TIEMPO INHABIL PERFORADORA	""
	01/01/2017 20:35:38	01/01/2017 21:32:37	0:56:59	120 Mecanica		IMPREVISTO MECANICO	""
	01/01/2017 21:32:37	01/01/2017 23:04:06	1:31:29	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	""
	01/01/2017 23:04:06	02/01/2017 00:10:34	1:6:28	1 Efectivo		PRODUCCION	""
	02/01/2017 00:10:34	02/01/2017 00:19:20	0:8:46	46 D.Noprg		ESPERA ENERGIA/COMBUSTIBLE	""
	02/01/2017 00:19:20	02/01/2017 00:42:13	0:22:53	120 Mecanica		IMPREVISTO MECANICO	""
	02/01/2017 00:42:13	02/01/2017 01:39:37	0:57:24	1 Efectivo		PRODUCCION	""
	02/01/2017 01:39:37	02/01/2017 01:49:31	0:9:54	107 D.Noprg		ABASTECIMIENTO DE AGUA	""
	02/01/2017 01:49:31	02/01/2017 02:02:17	0:12:46	1 Efectivo		PRODUCCION	""

Ilustración 15. Ejemplo de Reporte de Estado por Equipo

Se extrajo el reporte de la flota de perforadoras de control pared (SMARTROC), mensualizado para todo el año 2017, en que se detalla el estado en todo momento para cada equipo (ver Ilustración 15). Luego se filtraron aquellos estados que denotan una detención no programada por efecto de la ausencia de demarcaciones, presentándose un ejemplo en la Ilustración 16. Cabe destacar que a comienzos del año 2017 existían diversos códigos similares y hacia fin de año se evidencia una estandarización de la forma de reportar este estado, que finalmente se denomina “ESPERA MARCACIÓN”, código 23.



### Estado por Equipo

Fecha Inicial : 1/3/2017 A Fecha Final : 31/3/2017 B  
 Tipo de Equipo : Todo Flota : SMART-ROC  
 Estado : Todo Código : Todo

Equipo	Fecha - Hora Inici	Fecha Hora Final	Duracion	Codig	Categoria	Descripcion	Comentario
	01/03/2017 14:58:50	01/03/2017 19:03:20	4:4:30	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	05/03/2017 08:24:35	05/03/2017 10:29:19	2:4:44	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	05/03/2017 17:55:41	05/03/2017 18:14:39	0:18:58	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	05/03/2017 18:48:56	06/03/2017 12:49:44	18:0:48	54 D.Noprg		FALTA MARCACION	
			0:24:45	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	14/03/2017 16:53:55	14/03/2017 17:39:08	0:45:13	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	16/03/2017 08:52:51	16/03/2017 09:37:04	0:44:13	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	17/03/2017 08:16:42	17/03/2017 10:37:37	2:20:55	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	22/03/2017 05:21:35	22/03/2017 05:37:10	0:15:35	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	
	24/03/2017 10:02:44	24/03/2017 10:22:55	0:20:11	14 D.Noprg		ESPERA POR ESTACAS	

Ilustración 16. Ejemplo de filtro por espera de demarcación.

En la Ilustración 17 se presenta el comportamiento de las detenciones no programadas por concepto de falta de demarcaciones, a lo largo del año 2017, desagrupadas por equipo y como flota total.

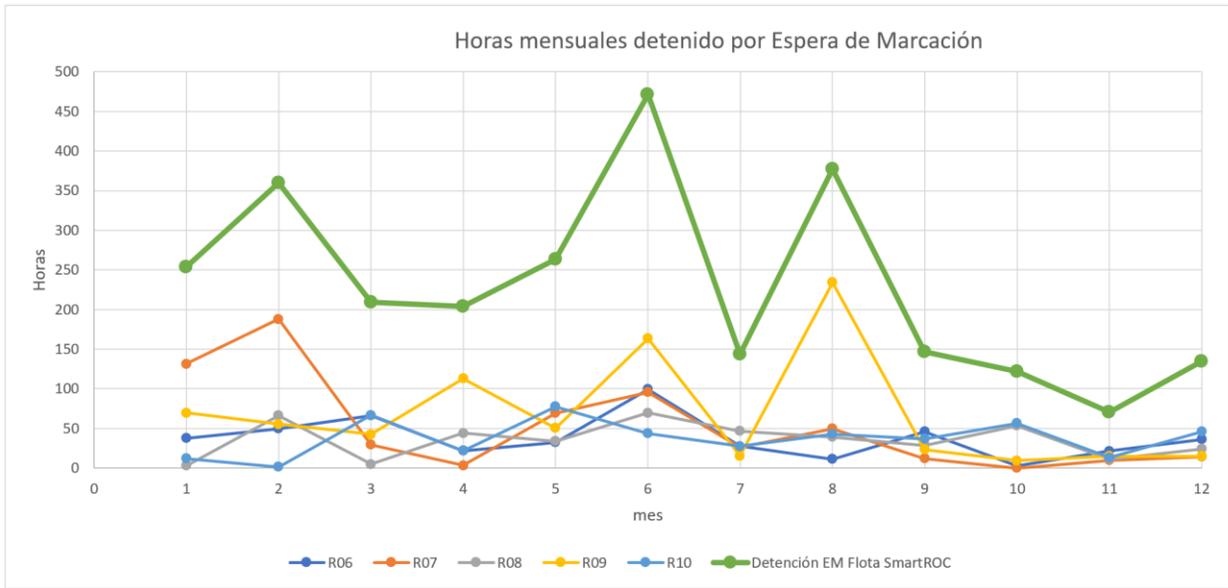


Ilustración 17. Horas de detención no programada asociadas a ausencia de demarcación.

En términos de tendencia, se aprecia una mejora en el desempeño durante el año. Se estima el porcentaje de horas de detención a causa de la falta de demarcación, respecto al total de horas nominales de la flota, indicador en el que se aprecia una estabilización en el último trimestre del año, en que promedia un 3% del tiempo total (Tabla 3). Se tomará este valor como representativo tomando en cuenta la tendencia positiva y un criterio conservador para las estimaciones sucesivas.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
R06	37,5	49,6	66,2	21,9	32,1	99,5	27,4	11,0	45,9	2,7	21,3	35,8
R07	131,3	187,7	29,3	3,4	69,4	95,5	26,4	49,5	12,0	0,0	9,8	14,2
R08	2,9	66,0	4,7	44,0	34,0	69,6	46,8	39,2	28,4	53,3	11,0	24,1
R09	69,5	55,3	42,5	113,1	50,3	163,1	15,4	234,2	23,2	9,2	15,0	14,8
R10	12,1	1,5	66,5	21,5	77,5	43,6	27,3	42,8	37,0	56,5	13,1	45,8
<b>Detención EM Flota SmartROC</b>	<b>253,2</b>	<b>360,1</b>	<b>209,1</b>	<b>203,9</b>	<b>263,2</b>	<b>471,3</b>	<b>143,3</b>	<b>376,8</b>	<b>146,6</b>	<b>121,8</b>	<b>70,2</b>	<b>134,8</b>
Horas Nominales Disponibles	3720	3360	3720	3600	3725	3600	3720	3715	3600	3720	3600	3720
% Espera de Marcas	7%	11%	6%	6%	7%	13%	4%	10%	4%	3%	2%	4%
										3%		

Tabla 3. Detención no programada a causa de falta de demarcación, respecto a horas nominales

En base a este indicador de un 3% de las horas disponibles, se puede proyectar que en base a los datos reales del 2017, en un año la flota de perforadoras de control pared completa un total de aproximadamente 1.921 hr de detención no programada por concepto de espera de demarcación. Son estas horas de “pérdida” las que se podrían capturar y transformar en valor para el negocio al implementar un sistema de referencias virtuales y prescindir de las demarcaciones físicas en terreno.

#### **4. MAPEO DE STAKEHOLDERS**

Se consideran las siguientes áreas de la División Radomiro Tomic, por la relevancia de su participación en el desarrollo de esta iniciativa:

- Superintendencia de Gestión y Planificación de Producción
- Superintendencia de Perforación y Tronadura
- Superintendencia de Operaciones Mina
- Superintendencia de Procesos Mina
- Superintendencia de Geotecnia
- Dirección de Prevención de Riesgos
- Dirección de Excelencia Operacional
- Dirección de Innovación
- Dirección TICA
- Dirección de Abastecimiento

Por otro lado, se requiere también involucrar a entes externos a la División, como lo son los proveedores de soluciones tecnológicas y eventualmente los fabricantes de los equipos a intervenir.

La inclusión de los *stakeholders* debe propiciarse desde las primeras etapas del proyecto, de modo de aprovechar el *expertise* técnico en cada una de sus disciplinas para optimizar la solución definitiva y así asegurar su aplicabilidad.

A su vez, se analizaron cuatro grupos de interés, que serían los principales afectados por la implementación de este proyecto; estos grupos son: Operadores, Supervisión de la Gerencia Mina, la empresa contratista proveedora del servicio de Topografía, y la alta dirección de Radomiro Tomic, representada en sus ejecutivos. El análisis se hizo mediante una matriz de Cambio/No cambio, presentada en el Anexo A , siendo bastante clara la conveniencia de implementar el proyecto para los cuatro grupos, incluido el proveedor de topografía, quien podría ver reducidos sus ingresos a una escala menor, pero aumentaría su productividad y reduciría drásticamente la exposición al riesgo de sus trabajadores.

#### **5. BENCHMARKING Y APLICACIONES SIMILARES DE DEMARCACIÓN VIRTUAL**

Hoy en día, si bien no específica para todos los requerimientos detallados (como demarcaciones para excavadora, por ejemplo), existe tecnología disponible para disponer de referencias virtuales de puntos topográficos en terreno. Por otro lado, en Radomiro Tomic ya existe una plataforma topográfica tal que permite la georreferenciación de puntos en cualquier parte del rajo. Luego, asoma la opción de entrelazar ambas soluciones para generar una solución combinada que permita hacer más eficiente el proceso y minimizar la exposición de los trabajadores que hoy están a cargo de materializar estas referencias en terreno.



*Ilustración 18. Tecnología relacionada, sistema Terrain de Finning.*

Por otro lado, actualmente equipos mineros incorporan como opcionales tecnologías similares. Como el sistema *Terrain* de Finning (Ilustración 18) orientado a equipos de movimiento de tierra, o las perforadoras de control pared SMARTROC D65 de Atlas Copco (Ilustración 19), presentes en División Radomiro Tomic, y que previa habilitación de complementos pueden navegar y prescindir de la demarcación. Estas opciones deben evaluarse y verificar su compatibilidad con el proyecto. De esta forma, al menos uno de los tipos demarcaciones que se apunta a eliminar, correspondiente a la perforación de control pared, no requiere una innovación tecnológica, sino que solamente la implementación de soluciones que están disponibles en el mercado, para equipos ya disponibles en la División.



*Ilustración 19. Tecnología de navegación, perforadoras SMARTROC D65 de Atlas Copco.*

## **6. APLICABILIDAD EN RADOMIRO TOMIC**

El proyecto no sólo es aplicable y atinente a la realidad de División Radomiro Tomic, sino que también resulta necesario para poder mantener competitividad, especialmente cuando el plan de largo plazo considera la explotación de sulfuros en profundidad, lo que multiplicará las dimensiones del rajo, y con ello los tiempos de traslado.

Una particularidad que simplifica en parte la aplicabilidad del proyecto, es que tanto la flota de perforadoras de control pared, como la flota de excavadoras, cuentan sólo con equipos del mismo

fabricante, Atlas Copco y Caterpillar respectivamente, por lo una solución tecnológica sería compatible para todos los equipos de cada línea.

Es importante relevar que en línea con el mapeo de *stakeholders* realizado, durante el desarrollo del presente trabajo se generó en conjunto con la Dirección TICA Divisional, una iniciativa que recoge la problemática y propuesta de solución planteada, que permitirá seguir avanzando en este tema, con una mirada transversal a nivel corporativo e involucrando a otros actores que pueden aportar en el desarrollo de la iniciativa.

El proyecto completo apunta a reemplazar la demarcación topográfica física por una aplicación tecnológica en dos actividades principales dentro de la operación en el rajo, el replanteo de la malla de perforación para las tronaduras de control pared (*buffer* y precorte), y la instalación de estacones de quebradura para la construcción de zanjas de control mediante excavadora.

En la matriz presentada en la Ilustración 20 se compara la dificultad de implementación versus el impacto de implementar el proyecto en cada una de estas actividades. En ambos casos se tiene un impacto medio-alto, conjugando seguridad y productividad, aunque la distribución de éste es diferente en función de en qué ámbito realizan su mayor aporte. La eliminación de la demarcación de quebradura tiene un mayor impacto en la seguridad, mientras que el mayor impacto de la eliminación de referencias de perforación apunta a la productividad.

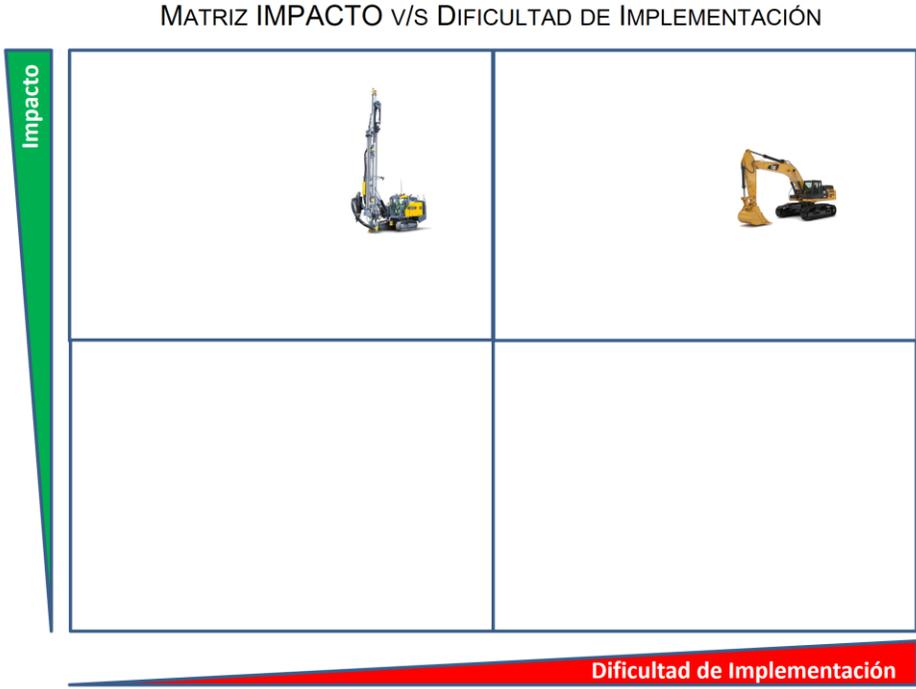


Ilustración 20. Matriz Impacto v/s Dificultad de Implementación, iniciativas

Por otro lado, si bien ambas iniciativas (demarcaciones virtuales para perforación de control pared y demarcaciones virtuales para construcción de zanja de control) son completamente aplicables en Radomiro Tomic, en términos de dificultad de implementación, existe una diferencia clara entre ambas. Mientras implementar una tecnología para eliminar la demarcación de quebradura en el contexto de operación en el que se necesitan requiere un desarrollo

tecnológico, el replanteo de pozos a perforar tiene alternativas disponibles en el mercado, que además son compatibles con los equipos y sistemas existentes en Radomiro Tomic.

Es por esto que el proyecto y su evaluación se centrarán en esta última iniciativa, para que luego aprovechando este *quick win*, sea posible apalancar la implementación del proyecto completo y extenderlo a otros tipos de demarcaciones hoy existentes, incluida la demarcación de quebradura para la construcción de zanjas de control.

De hecho, CODELCO a través de los lineamientos entregados por su Gerencia corporativa de Innovación y Tecnología hace esta diferencia, clasificando los proyectos de innovación en tres ámbitos distintos, presentados en la Ilustración 21.



Ilustración 21. Ámbitos de la innovación en la Industria Minera (Carmona, 2017).

Así, los proyectos se agrupan de acuerdo a si corresponden a una Innovación Disruptiva, es decir, a un desarrollo completamente nuevo que genera un quiebre tecnológico, y dará origen a una ventaja competitiva; o a un proyecto de Transformación Digital, que en general son de más corto aliento, y lo que hacen es capturar avances tecnológicos e incorporarlo a sus procesos, impactando generalmente en la productividad. Además, existe un nivel intermedio, la Innovación Incremental, donde se desarrolla un proyecto para adaptar una tecnología existente y utilizarla en una aplicación diferente.

Usando esta lógica de clasificación, el reemplazo de demarcaciones físicas por virtuales para el proceso de perforación de control pared en Radomiro Tomic corresponde a un proceso de Transformación Digital, ya que toma tecnología disponible en el mercado. Por otro lado el desarrollo o adaptación tecnológica para eliminar la demarcación física de quebradura se trata de un proceso de Innovación Incremental, que en función de la complejidad tecnológica que

conlleve y la amplitud de la solución que se plantee, podría tener aspectos incluso de Innovación Disruptiva.

CODELCO ha definido que sus faenas deben abordar, e través de sus Direcciones de Innovación divisionales, principalmente proyectos acotados en el ámbito de la Transformación Digital, y centralizar los proyectos de más largo aliento (innovación disruptiva y/o innovación incremental) a través de la Gerencia corporativa de Innovación y Tecnología, que a su vez se apoyará fuertemente en la filial de desarrollo tecnológico de la estatal, Codelco Tech. Luego, resulta sensata la estrategia descrita anteriormente de, en una primera instancia, centrar los esfuerzos en la implementación de demarcaciones virtuales para perforación de control pared.

En este contexto, junto con entablar contacto con potenciales nuevos proveedores de tecnología, se solicitó al actual proveedor en Radomiro Tomic de sistemas de comunicación y posicionamiento de equipos mineros (Jigsaw Technologies, del grupo Hexagon), evaluar y cotizar un sistema que permitiera a las perforadoras de control pared (flota SmartRoc) prescindir de demarcaciones físicas para la perforación de pozos *buffer* y precorte. En línea con los intereses y preocupaciones planteados por las áreas operativas y ligadas más directamente a la producción, de que el sistema fuese lo suficientemente robusto para no comprometer la continuidad operacional, se decidió solicitar una implementación que fuese capaz de operar incluso en zonas con escasa o nula disponibilidad de señal GNSS (sistema global de navegación por satélite, de su nombre en inglés: *Global Navigation Satellite System*), problemática que podría ocurrir especialmente en las zonas más profundas del rajo, en que los taludes impidieran una comunicación satelital adecuada.

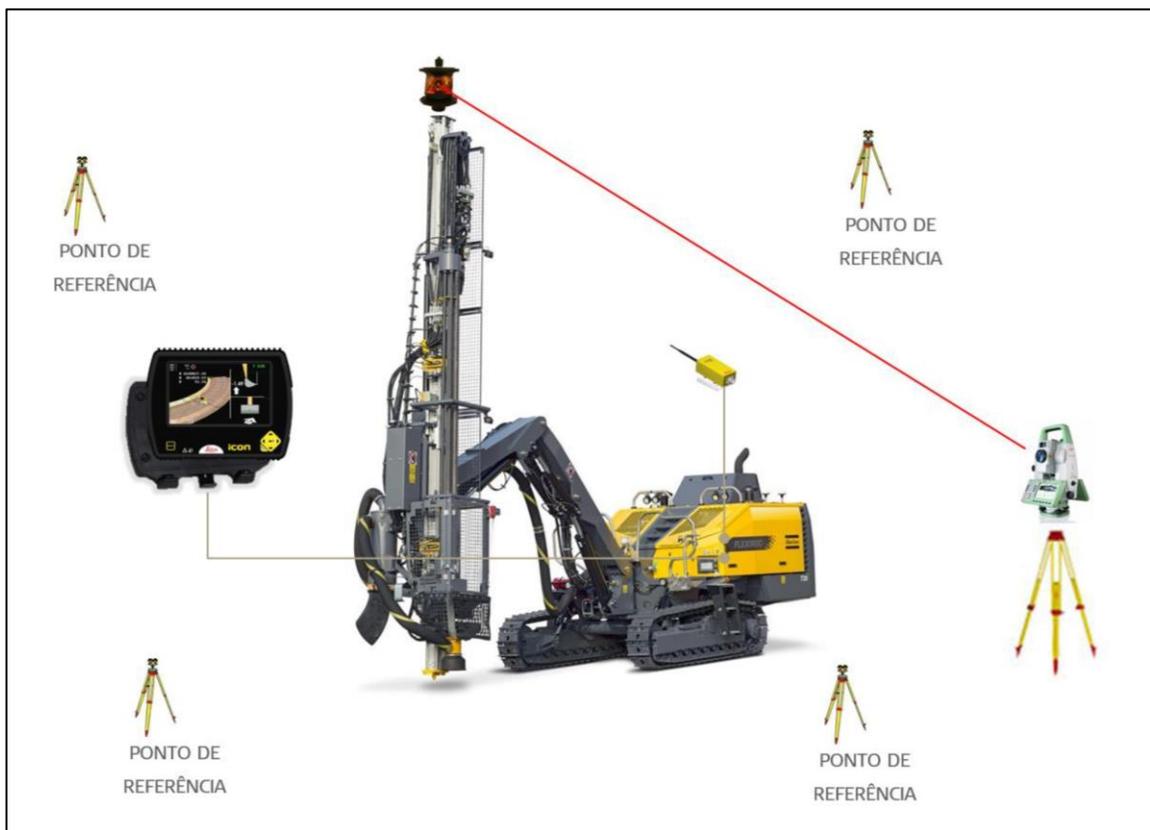


Ilustración 22. Esquema propuesto de habilitación de perforadoras (Jigsaw Technologies, 2018)

En Marzo de 2018 se recibió la propuesta de Jigsaw Technologies, consistente en un sistema de posicionamiento apoyado por estaciones totales robotizadas emplazadas en puntos de referencia conocidos, junto a un prisma 360° instalado en la torre de la perforadora (ver Ilustración 22).

El sistema estación total-prisma permite conocer en todo momento el punto exacto de la broca de perforación, para luego trasladando el equipo posicionarla sobre cada punto a perforar consignado en el diseño de la malla de perforación. El operador contaría en cabina con un panel de control, con una pantalla *touch* de 7", con el software *visual machine*, responsable de presentar las mencionadas demarcaciones virtuales, como se aprecia en la Ilustración 23. Luego, habiendo implementado esta solución, se eliminaría la necesidad de demarcar físicamente la malla de perforación de control pared, que actualmente se realiza instalando una estaca por pozo a perforar.



Ilustración 23. Monitor y visualización en cabina de demarcaciones virtuales para perforación.

Es relevante indicar que esta propuesta fue en primera instancia validada técnicamente por la Gerencia Mina, futuros usuarios de este sistema.

## 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

### Costos del Proyecto

Recogiendo el foco principal del presente proyecto, que es la seguridad de las personas mediante la reducción de la exposición al riesgo, eliminando actividades con riesgos inherentes imposibles de controlar al 100%, primero se evaluará el costo de implementar esta solución, sin exigirle al proyecto retornos o beneficios económicos, tomándolo únicamente como una iniciativa de reducción de riesgos.

De acuerdo a lo presentado anteriormente, se abordará en esta evaluación la primera etapa del proyecto, de implementación de referencias virtuales para la perforación de control pared. Para este caso, la alternativa más viable de implementar en el corto/mediano plazo es instalar el sistema de posicionamiento con el proveedor que opera actualmente en la División (Hexagon – Jigsaw), y que ya tiene operativo un sistema similar con otro tipo de equipos, como las

perforadoras de producción. Las tarifas preliminares (a formalizar) indicadas por el proveedor son las indicadas en la Tabla 4.

Item / Perforadora		R06	R07	R08	R09	R10	TOTAL FLOTA
Sistema Posicionamiento: Leica iRD3 Driller TPS + Estación Total Robótica TS16P 3"	USD	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000	325.000
Instalación, Calibración Entrenamiento y Soporte	USD	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	100.000
<b>Inversión</b>	<b>USD</b>						<b>425.000</b>
Mantenimiento anual sistema	USD/año	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	50.000
<b>Operación</b>	<b>USD/año</b>						<b>50.000</b>

\* Valores de inversión de acuerdo a cotización formal entregada por Hexagon - Jigsaw Technologies Ltda. Costo de mantenimiento de acuerdo a actual servicio relacionado.

*Tabla 4. Costos implementación y mantención del sistema de posicionamiento.*

En resumen, implementar esta solución, tendría un costo de 425.000 USD para toda la flota de perforadoras de control pared, más un costo de mantención anual de 10.000 USD por equipo. Es importante destacar que estos montos, en especial el de mantención se logran por el hecho de ya contar con un servicio similar del proveedor en faena, con los ahorros que eso implica.

Se estima que tras la inversión inicial, el pagar un costo de 50.000 USD al año (4.167 USD mensuales), respecto a eliminar una actividad de un exposición al riesgo relevante, es aceptable en función de lo prioritaria que es la seguridad en la División y Corporación.

### **Beneficios directos del Proyecto**

No obstante lo anterior, y de acuerdo a lo planteado en un comienzo, este proyecto permitirá reducir costos y a la vez trae consigo importantes mejoras de productividad.

Existe un ahorro de materiales producto de prescindir de las estacas de perforación, que de acuerdo a los datos presentados en la Tabla 2 tienen un consumo medio en el quinquenio 2018-2022 de 3.380 unidades mensuales, lo que se traduce en un ahorro de aproximadamente **1.014 USD mensuales** por este concepto. Luego, eliminar esta actividad también permite ajustar las cuadrillas de geomensura, considerando que una de las cuadrillas (que opera en turno continuo, 7x7) considera 2 alarifes en vez de uno, por la sobrecarga que implica realizar las demarcaciones. Por lo tanto, una vez implementado este sistema de forma satisfactoria, podría reducirse el tamaño de la cuadrilla, de 3 a 2 personas, lo que considerando ambos turnos significa disminuir la dotación en 2 trabajadores de tiempo completo, optimizando el FTE (*Full Time Equivalent*), y pudiendo negociar un ahorro en el costo del servicio. El costo aproximado de los servicios de un alarife para Codelco se estima en 2.502 USD mensuales por cada uno, es decir, se lograría un ahorro de **5.003 USD/mes.**

Esto se puede ver más ordenado en la Tabla 5, donde se consideran seis meses de puesta en marcha, en que se mantiene el servicio actual sin alteraciones, y se comienza a poner operativo el sistema en las perforadoras de forma gradual: los primeros dos meses sólo en una perforadora, el tercer mes se incorpora a dos nuevas máquinas, y el cuarto mes a las dos perforadoras restantes, de modo de finalizar la puesta en marcha con tres meses en que el sistema opera en la flota completa. También se incorpora un apartado de contingencias, correspondiente al 5% de los egresos mensuales. Una vez finalizados los seis meses de puesta en marcha, se elimina el servicio de demarcación física y se introducen los ahorros antes descritos al cálculo del flujo de caja.

Análisis mensual	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
Inversión Equipamiento (USD)	-\$ 425.000									
Mantenimiento Sistema Navegación (USD)		-\$ 833	-\$ 833	-\$ 2.500	-\$ 4.167	-\$ 4.167	-\$ 4.167	-\$ 4.167	-\$ 4.167	...
Contingencias (USD)	-\$ 21.250	-\$ 42	-\$ 42	-\$ 125	-\$ 208	-\$ 208	-\$ 208	-\$ 208	-\$ 208	...
Reducción dotación (USD)								\$ 5.003	\$ 5.003	...
Ahorro materiales - estacas (USD)								\$ 1.014	\$ 1.014	...
<b>Flujo</b>	<b>-\$ 446.250</b>	<b>-\$ 875</b>	<b>-\$ 875</b>	<b>-\$ 2.625</b>	<b>-\$ 4.375</b>	<b>-\$ 4.375</b>	<b>-\$ 4.375</b>	<b>\$ 1.642</b>	<b>\$ 1.642</b>	...

*Tabla 5. Flujo costos y ahorros.*

Como se aprecia en el flujo de caja, mientras dura la puesta en marcha sólo existe costo, pero a contar del séptimo mes, donde se elimina la actividad de demarcación física, los ahorros directos incluso superan al costo de mantenimiento del sistema, por lo que se puede decir que **el sistema cubre sus costos de operación**, aunque la magnitud de los ahorros no es suficiente para cubrir la inversión inicial en el corto plazo.

### **Beneficios del Proyecto considerando el aumento de productividad**

Tal como se detalló en el levantamiento de la condición actual, específicamente en la Tabla 3, hoy existen ineficiencias operacionales asociadas a la espera de demarcaciones físicas, las que a su vez involucran traslados considerables y están sujetas a restricciones como por ejemplo el hecho de que sólo pueden realizarse con luz día. De acuerdo a lo explicado en el apartado previamente citado, de forma conservadora se considerará que el 3% del tiempo nominal, las perforadoras están detenidas por falta de demarcación. Esto se valorizó como el costo de la perforación adicional que podría hacerse en esas horas de detención, pero que no se realiza porque al faltar las demarcaciones físicas el equipo queda detenido a la espera. Este cálculo se resume en la Tabla 6, en que se indican los parámetros utilizados, una tasa de perforación de 20 m/hr y un costo de perforación de 10,5 USD/m.

Debe tenerse en cuenta que esta estimación equivale a un “costo oportunidad” y no a un ingreso real, sin embargo, resulta relevante no despreciarlo y por ello se calcula el valor que es posible “rescatar” mensualmente si se implementa el sistema de demarcación virtual y con ello se eliminan las detenciones por espera de instalación de referencias.

Horas de detención	
% detención promedio	3%
Horas totales flota SmartRoc (año)	43.800
Horas de detención por falta de demarcación (año)	1.291
Horas de detención por falta de demarcación (mes)	108

Costo de la Detención	
Tasa Perforación (m/hr)	20
Costo perforación (USD/m)	10,5
Metros no perforados (m/mes)	2.152
<b>Costo metros no perforados (USD/mes)</b>	<b>22.600</b>

*Tabla 6. Cálculo costo de detención por falta de demarcación.*

Con este monto calculado (22.600 USD/mes) se complementa el Flujo de Caja anteriormente presentado, incorporándolo a partir del séptimo mes. Luego, se realiza un consolidado anual, con el cual se estima el  $\Delta$ VAN que aporta este proyecto, considerando una tasa de descuento del 8%, habitualmente utilizada en la Corporación.

En resumen, para estimar el  $\Delta$ VAN del proyecto se incorpora la inversión inicial y los costos de mantención del sistema, además de una contingencia del 5% del total de los egresos. Para esto se asume que se paga el costo de los equipos una vez instalado el sistema en las perforadoras, y el costo de mantención se comienza a pagar gradualmente a medida que los equipos comienzan a operar con el nuevo sistema durante el proceso de Implementación, descrito en el Capítulo 8.

En el caso de los beneficios, se asume que comienzan a ser percibidos a contar del séptimo mes (después de los seis meses de Puesta en Marcha, explicado en apartado del Programa de Implementación), y considera los ahorros producto de la eliminación de la actividad de demarcación física de perforación de control pared, esto es, cese de compra de estacas, y reducción de la dotación (alarife). Además, se suma un monto por efecto del aumento de productividad en el proceso de perforación, y cuyo cálculo se detalla en la Tabla 6.

Es por esto que como en el año 1 considera el ingreso diferenciado de los equipos de perforación al sistema, y los beneficios sólo en el segundo semestre, tiene una distribución de egresos e ingresos particular. Sin embargo, a partir del año 2 los flujos se asumen iguales dentro de los 5 años de evaluación del proyecto.

Como se presenta en la Tabla 7, con los parámetros indicados se obtiene un  $\Delta$ VAN de 152.563 USD evaluado a tres años, y 564.375 USD si la evaluación se realiza a cinco años.

Resumen anual	0	1	2	3	4	5
Inversión Equipamiento (USD)	-\$ 425.000					
Mantenimiento Sistema Navegación (USD)		-\$ 41.667	-\$ 50.000	-\$ 50.000	-\$ 50.000	-\$ 50.000
Contingencias (USD)	-\$ 21.250	-\$ 2.083	-\$ 2.500	-\$ 2.500	-\$ 2.500	-\$ 2.500
Reducción Dotación (USD)		\$ 30.020	\$ 60.040	\$ 60.040	\$ 60.040	\$ 60.040
Ahorro materiales - estacas (USD)		\$ 6.084	\$ 12.167	\$ 12.167	\$ 12.167	\$ 12.167
Valor Productividad Perforación (USD)		\$ 135.600	\$ 271.200	\$ 271.200	\$ 271.200	\$ 271.200
<b>FLUJO</b>	<b>-\$ 446.250</b>	<b>\$ 127.954</b>	<b>\$ 290.907</b>	<b>\$ 290.907</b>	<b>\$ 290.907</b>	<b>\$ 290.907</b>
<b><math>\Delta</math>VAN (5 años)</b>	<b>\$ 564.375</b>					
<b><math>\Delta</math>VAN (3 años)</b>	<b>\$ 152.563</b>					
<b>Tasa de descuento</b>	<b>8%</b>					

Tabla 7. Flujo de Caja y estimación  $\Delta$ VAN, caso base.

Dado que se tiene claridad de que el valor estimado como productividad de la perforación, no es un ingreso real, y su captura no es tan sencilla de implementar, a modo de análisis de sensibilidad se repite la estimación del  $\Delta$ VAN reduciendo este aporte al 50%. Este nuevo análisis se presenta en la Tabla 8.

Resumen anual	0	1	2	3	4	5
Inversión Equipamiento (USD)	-\$ 425.000					
Mantenimiento Sistema Navegación (USD)		-\$ 41.667	-\$ 50.000	-\$ 50.000	-\$ 50.000	-\$ 50.000
Contingencias (USD)	-\$ 21.250	-\$ 2.083	-\$ 2.500	-\$ 2.500	-\$ 2.500	-\$ 2.500
Reducción Dotación (USD)		\$ 30.020	\$ 60.040	\$ 60.040	\$ 60.040	\$ 60.040
Ahorro materiales - estacas (USD)		\$ 6.084	\$ 12.167	\$ 12.167	\$ 12.167	\$ 12.167
Valor Productividad Perforación (USD)		\$ 67.800	\$ 135.600	\$ 135.600	\$ 135.600	\$ 135.600
<b>FLUJO</b>	<b>-\$ 446.250</b>	<b>\$ 60.154</b>	<b>\$ 155.307</b>	<b>\$ 155.307</b>	<b>\$ 155.307</b>	<b>\$ 155.307</b>
<b><math>\Delta</math>VAN (5 años)</b>	<b>\$ 85.742</b>					
<b><math>\Delta</math>VAN (3 años)</b>	<b>-\$ 134.113</b>					
<b>Tasa de descuento</b>	<b>8%</b>					

Tabla 8. Flujo de Caja y estimación  $\Delta$ VAN, análisis de sensibilidad.

Se evidencia que el  $\Delta$ VAN evaluado a 3 años pasa a ser levemente negativo, es decir, le genera un costo a la División, el que se considera admisible en función de los beneficios inherentes. Pero a un plazo de 5 años o más, los flujos positivos logran cubrir la inversión y los costos de operación.

Se estima que cinco años es un plazo razonable para realizar la evaluación, considerando que con un servicio de mantenimiento permanente, los equipos de posicionamiento debiesen tener una vida útil superior a dicho periodo.

### **Evaluación del potencial Impacto Económico de accidente asociado a actividad actual**

El principal objetivo del proyecto es disminuir la exposición al riesgo de los trabajadores, eliminando una actividad con un riesgo inherente de baja probabilidad de ocurrencia de pero imposible de eliminar, que es la posibilidad de que al trabajar muy cerca de los taludes, los trabajadores puedan ser impactados por una roca que caiga desde niveles superiores, evento que ha ocurrido anteriormente en la Corporación. Este riesgo principal se acompaña de otros complementarios, como el transitar cerca de pozos perforados, y las condiciones desfavorables desde el punto de vista ergonómico del proceso actual, en que se requiere que el trabajador opere agachado de forma repetitiva y por largos periodos.

Dadas las características del evento analizado, es posible que éste tenga consecuencias graves o fatales, lo que sumado al irreparable daño para el afectado y su familia, significa la activación de un protocolo normado por ley, que además de la obligación de informar, estipula la autosuspensión de faenas.

La Ley N° 20.123, que regula el trabajo en régimen de subcontratación, el funcionamiento de las empresas de servicios transitorios y el contrato de trabajo de servicios transitorios, incorporó en su artículo 7°, letra b), incisos de la Ley N° 16.744 que dicen:

*“Sin perjuicio de lo dispuesto en los incisos precedentes, en caso de accidentes del trabajo fatales y graves, el empleador deberá informar inmediatamente a la Inspección del Trabajo y a la Secretaría Regional Ministerial de Salud que corresponda, acerca de la ocurrencia de cualquiera de estos hechos. Corresponderá a la Superintendencia de Seguridad Social impartir las instrucciones sobre la forma en que deberá cumplirse esta obligación.*

*En estos mismos casos el empleador deberá suspender de forma inmediata las faenas afectadas y, de ser necesario, permitir a los trabajadores la evacuación del lugar de trabajo. La reanudación de faenas sólo podrá efectuarse cuando, previa fiscalización del organismo fiscalizador, se verifique que se han subsanado las deficiencias constatadas.”*

Por lo tanto, se asumirá el caso de un accidente grave o fatal, en que la faena sería suspendida temporalmente.

CODELCO cuenta con un Procedimiento Estructural que regula la evaluación de pérdidas por diversos motivos, incluyendo problemas operacionales e incluso accidentes. El SGR-P-012 Procedimiento para la Gestión de Pérdidas, regula la valorización de eventos que afectan a personas, y define que se debe considerar:

- a) Ausentismo
- b) Valorización de pérdidas por Accidentes que afecten la salud de las personas

Este segundo punto incluye prestaciones médicas, prestaciones económicas, gastos de administración, indemnizaciones y pensiones.

Por otro lado, el mismo procedimiento estructural regula la valorización de eventos que afecten la continuidad operacional. En este concepto se define la Pérdida de Producción Estimada (PPE), que se calcula como:

$$\text{PPE} = Q \times (P - CV) \text{ USD}$$

donde,

Q : Producción no lograda

P : Precio de venta

CV : Costo Variable

En la Tabla 9 se presentan la producción real y proyectada de cobre fino de los años 2017 y 2018 respectivamente, y luego con la proyección de 2018 se calcula un valor medio de producción diaria, correspondiente a 861 toneladas de cobre fino por día, sumando línea óxidos y línea sulfuros. Luego, la producción no lograda (Q) sería 861 toneladas por cada día de detención.

Cobre fino producido		2017 real	2018 proyectado
Línea Óxidos	tmf	234.863	209.791
Línea Sulfuros	tmf	83.098	104.581
<b>Total</b>	<b>tmf</b>	<b>317.961</b>	<b>314.373</b>

2018		
Producción diaria media OXIDOS	tmf	575
Producción diaria media SULFUROS	tmf	287
<b>Producción diaria media TOTAL</b>	<b>tmf</b>	<b>861</b>

*Tabla 9. Estimación producción diaria media.*

Como precio de venta (P) se considera para el ejemplo el precio del cobre al día 01 de Febrero de 2018, correspondiente a 318,7 c/lb. Por su parte, el costo variable (CV) se estimará de forma aproximada como el 30% del C1 medio del año 2017, que fue de 130,9 c/lb, por ende, CV estimado es de 39,3 c/lb. Haciendo las transformaciones de unidades correspondientes se llega a:

$$\text{PPE (1 día)} = 861 \text{ Ton} \times (7.026 \text{ USD/Ton} - 866 \text{ USD/Ton})$$

$$\text{PPE (1 día)} = 5.305.976 \text{ USD}$$

Luego, por cada día de detención (sin considerar medidas de mitigación posteriores) se estima una pérdida superior a los 5 millones de dólares, orden de magnitud tal que no se requiere calcular su impacto en el  $\Delta$ VAN para cuantificar su relevancia, estando muy por sobre los costos del proyecto, incluso sin considerar los puntos descritos en la valorización de pérdidas por accidentes que afecten la salud de las personas, que harían aumentar esta cifra.

Por lo tanto, se ratifica la necesidad de desarrollar este proyecto, que además de su claro aporte a la seguridad, también tiene aportes interesantes en el plano económico.

Cabe destacar, que esta estimación de beneficios es conservadora, al contabilizar como aporte en productividad solamente la optimización de la operación de perforación, y no incluir eventuales efectos positivos indirectos, como el hecho de que, al optimizar la operación unitaria de perforación, por consecuencia se puede reducir el número de eventos de tronadura a la semana, y con ello optimizar el proceso de carguío y transporte. Por otra parte, también se presume una evaluación de costos conservadora, al realizarse con la única cotización formal disponible al momento de concluir el presente trabajo, sin embargo, cabe la posibilidad de que proveedores alternativos podrían ofrecer soluciones similares con costos inferiores, o incluso negociar con este oferente para lograr mejores tarifas, considerando que es su primera oferta. Luego, el potencial económico de este proyecto puede ser incluso superior a esta estimación.

## **8. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN SISTEMA DE DEMARCACIÓN VIRTUAL**

### **Análisis de Riesgos**

La implementación de este proyecto comprende riesgos que deben gestionarse de modo de controlarlos y evitar que comprometan el éxito de la iniciativa. Dentro de las principales amenazas a tener en cuenta se destacan:

- Resistencia al cambio de operadores: Ya que se modificará la forma tradicional de trabajar, mantenida por muchos años y que no presenta oposición por parte de los trabajadores. Se debe sensibilizar a los operadores, respecto a los beneficios en términos de seguridad y productividad de la iniciativa, previniendo conflictos laborales y/o sindicales.
- Control Operativo de remate de bancos: Hoy al controlar el servicio de Geomensura, a cargo de la instalación de demarcaciones físicas, la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, a través de las áreas de Geotecnia y Gestión y Planificación de Producción, puede llevar el control de los bancos aprobados y entregados para el posterior proceso de Perforación y Tronadura, gestionando la instrucción de instalar estacas. Al reemplazarse este sistema por referencias virtuales se perdería esa forma de control, por lo que deben generarse protocolos de entrega de mallas de perforación efectivos, para resguardar la disciplina operacional en este sentido.
- Restricciones contractuales. Licencias: En la medida que se adquieran o contraten sistemas tecnológicos, se debe poner especial atención en los acuerdos comerciales, de modo de asegurar su transversalidad y aplicabilidad en los diferentes equipos que forman o podrían formar parte de la flota de la División.
- Resistencia de contratista de Topografía: Si bien el proyecto apunta a eliminar algunas actividades de alta exposición, y con ello se proyecta un ajuste dotacional, no se pretende eliminar el actual servicio de geomensura, por lo que se debe resguardar la relación con la

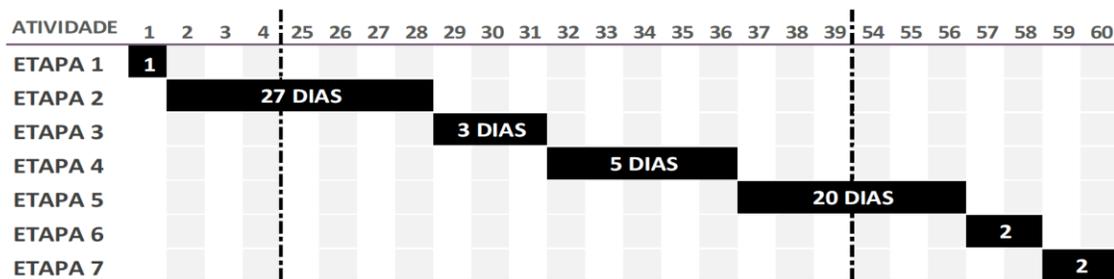
empresa proveedora, reforzando el hecho de que el proyecto también la beneficia en el entendido de reducir el riesgo y permitir al personal, al minimizar la instalación de demarcaciones, dedicarse a actividades de mayor valor agregado.

- **Conectividad Total:** Para el éxito del proyecto se necesita tener “iluminados” todos los sectores del rajo en donde operarán las perforadoras y excavadoras. Este desafío cuenta con una solución técnica conocida (instalación de antenas repetidoras) en el caso de encontrarse puntos ciegos, pero es clave realizar este levantamiento antes de la implementación de los sistemas en los equipos, en la etapa de análisis técnico junto a los especialistas.
- **Mayor parte del valor agregado es difícil de cuantificar:** Si bien existen beneficios económicos directos, como puede ser el ahorro al destinar menos recursos a la demarcación topográfica mediante estacas físicas, éstos no son demasiado significativos para los estándares de la industria. Los principales impactos se relacionan con la reducción de la exposición al riesgo, y con el aumento de la productividad de los equipos. Ambos factores serán cuantificados, aunque el hecho de ser potenciales más que flujos efectivos de dinero, significa un mayor desafío para conseguir los *sponsors* requeridos por el proyecto.

### Programa de Pilotaje

Se considera realizar una prueba piloto, o prueba industrial, consistente en implementar el sistema en una perforadora de División Radomiro Tomic, y hacerlo funcionar en condiciones reales, esto es: con operadores de la dotación de Radomiro Tomic, perforando pozos a tronar en alguna de las fases productivas del rajo.

Se solicitó al potencial proveedor, Jigsaw Technologies, diseñar una prueba piloto que considerara todo lo necesario para llevarla a cabo y poder evaluar el sistema. Este programa se presenta en la Ilustración 24, y tiene una duración total de 60 días, periodo en el que se considera desde la preparación de la demostración, hasta la desinstalación del equipamiento al final de la prueba.



Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6	Etapa 7
Reunión de aprobación de demo	Preparación para demo	Instalación, calibración, pruebas preliminares de lo sistema	Entrenamientos	Producción con el sistema	Evaluación del desempeño	Desinstalación

Ilustración 24. Programa prueba piloto (Jigsaw Technologies, 2018).

Esta prueba piloto, tiene un costo de 26 KUSD, y considera un set de 11 pruebas de validación concordadas entre el proveedor y la División Radomiro Tomic que deben ser todas aprobadas, sin excepción, para declararse el éxito del pilotaje. Estas se resumen en una lista de chequeo, presentada en la Tabla 10.

Test	Descripción	Aprueba/Falla
1	Estacionamiento TS16 (Estación Total)	
2	Ingreso del diseño en panel	
3	Selección del diseño de perforación	
4	Localización de Perforadora en el diseño	
5	Selección del punto a perforar, y navegación hasta el punto	
6	Almacenamiento del punto perforado y guardado en el diseño	
7	Almacenamiento de la profundidad del pozo perforado	
8	Selección del próximo punto	
9	Reporte de Perforación	
10	Acceso remoto a pantalla	
11	Comparación entre el posicionamiento con metodología tradicional con el sistema	

Tabla 10. Resumen de pruebas de validación del funcionamiento del sistema.

## Programa de Implementación

Luego, una vez validada la prueba industrial en el entorno real en que se desempeñarán los equipos, puede comenzarse con la implementación del sistema en la flota. Ésta se realizará en forma gradual, como se presenta en la Ilustración 25, comenzando por las demarcaciones de perforación, y no invirtiendo en adecuación de equipos para la segunda fase del proyecto (demarcación de quebradura) hasta que la primera se encuentre ya en operación, después de haber pasado en forma satisfactoria la etapa puesta en marcha. Este esquema presume la validación de tecnología a través de una prueba industrial previa, para el caso de las demarcaciones de zanja de control (excavadora); de lo contrario debe obviarse el flujo esquematizado en la fila central, manteniéndose todo lo demás sin variación.

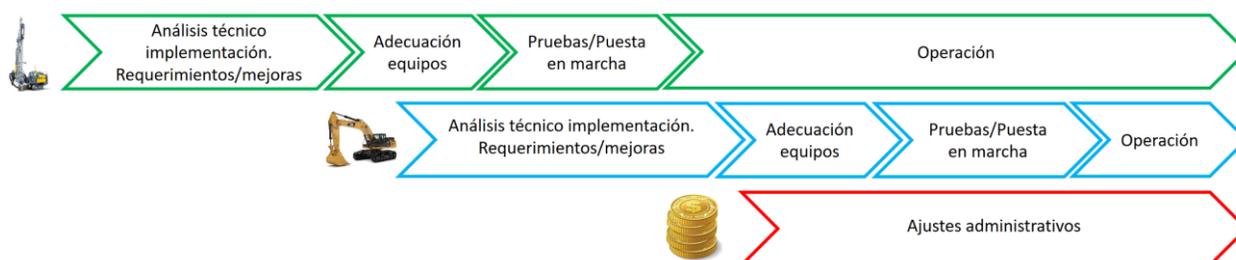


Ilustración 25. Secuencia de implementación del proyecto.

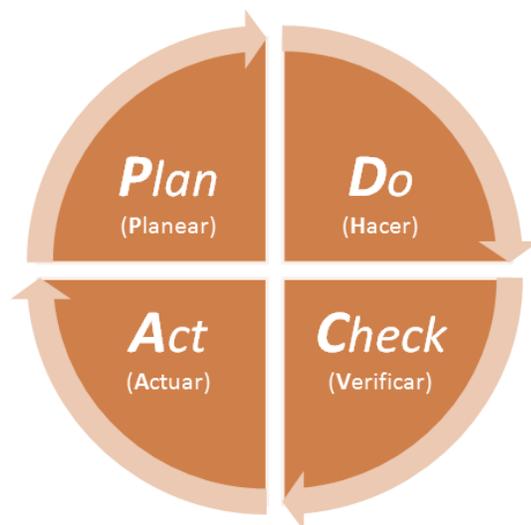
La etapa de Análisis Técnico inició con el presente trabajo y se continúa desarrollando en interacción con las áreas responsables y el proveedor. La etapa de adecuación de equipos y del entorno dará el inicio a la fase inversional, y se estima no debiese superar los tres meses de duración, una vez concluido el proceso de adjudicación.

La etapa de Puesta en Marcha considera un plazo de seis meses, durante los cuales se irá poniendo en operación el sistema de forma gradual en las perforadoras de la flota. Se inicia con sólo una perforadora durante dos meses, validado esto, se activa el sistema en dos más al tercer mes y en las últimas dos máquinas durante el cuarto mes, de modo de finalizar con las cinco perforadoras operando con el sistema de posicionamiento durante tres meses bajo continua supervisión por parte del proveedor. Durante los seis meses de puesta en marcha, el servicio de geomensura debe permanecer sin variaciones, con la misión de verificar la precisión de las demarcaciones virtuales una vez perforados los pozos, así como suplir las eventuales fallas del sistema durante la puesta en marcha.

No se debe confundir la etapa previa de Prueba Industrial o Pilotaje, descrita en el apartado anterior, en que se testea por un tiempo acotado una tecnología para validar o descartar su utilidad y desempeño en un único equipo trabajando en un entorno real; con la etapa de Puesta en Marcha, en que habiéndose aprobado la etapa anterior, se ha tomado la decisión de adoptar la implementación a nivel de flota, pero de igual forma se debe ir probando y monitoreando su desempeño, para tomar las acciones correctivas antes de entregar definitivamente a la operación.

Es importante que las medidas administrativas que se decidan implementar, como reducción de dotación o suspensión de adquisición de materiales para la demarcación física, se tomen únicamente una vez concluida íntegramente la etapa de Puesta en Marcha, y habiendo obtenido resultados satisfactorios.

El adecuado cierre y evaluación de la Puesta en Marcha, antes de realizar ajustes administrativos va en línea con lo propuesto por el ampliamente difundido Ciclo de Deming o Ciclo PDCA por sus iniciales en inglés (ver Ilustración 26), que plantea que todo proceso de mejora, se compone de cuatro etapas: planear, hacer, verificar, y actuar. Esta última etapa (actuar) hace referencia al adoptar la nueva metodología sólo una vez completado el ciclo, para posteriormente iniciar un nuevo ciclo en búsqueda de la mejora continua.



*Ilustración 26. Ciclo de Deming, estrategia de mejora continua.*

El Ciclo de Deming, es tomado por la Norma ISO 9001:2015, sobre sistemas de Gestión de Calidad, que lo considera en la estructura de sus requerimientos. División Radomiro Tomic se encuentra actualmente certificada bajo esta norma, por lo que es completamente atingente no alejarse de esta estrategia de implementación, para una modificación del proceso de la relevancia de la presente iniciativa.

### **Estrategia de Gestión del Cambio**

La Gestión del Cambio en este proyecto tiene la necesidad particular de ser transversal a diferentes actores de la organización, considerando personal propio y colaboradores. Este grupo incluye a operadores mina, que además cuentan con organizaciones sindicales fuertes que deben ser consideradas. Es importante que, en el proceso de pilotaje e implementación, se involucre activamente a todos los *stakeholders*, tomando en cuenta los intereses de cada grupo afectado, como los descritos en la matriz de Cambio/No Cambio analizada (Anexo A).

Para esta estrategia es relevante seguir el plan de implementación descrito anteriormente, comenzando por la eliminación de la demarcación de pozos para tronaduras de control pared, proceso de más fácil implementación y más cercano para todos los *stakeholders*, para luego, una vez implementada esa solución continuar con los otros procesos a optimizar, que demandan un mayor desarrollo tecnológico. De esta forma, comenzando por un cambio más sencillo, conocido y de rápidos resultados, se puede facilitar la aceptación y el involucramiento con el proyecto de los actores claves para su éxito.

Actualmente, Geotecnia y Gestión y Planificación de Producción (ambas áreas de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo), llevan el control de los bancos aprobados y entregados para el posterior proceso de Perforación y Tronadura, gestionando la instrucción de instalar estacas. Al reemplazarse este sistema por referencias virtuales se perdería esa forma de control, por lo que deben generarse protocolos de entrega de mallas de perforación efectivos, para resguardar la disciplina operacional en este sentido. Es relevante generar y comunicar adecuadamente estos protocolos antes de cambiar el sistema actual, para evitar desviaciones en la operación.

### **Campos Futuros de Desarrollo**

En el contexto de la automatización, orientada a mejoras en seguridad y productividad, resulta natural que después de optimizar el proceso de demarcación topográfica, y retirar a las cuadrillas de geomensura de la exposición al riesgo, el paso siguiente sea retirar a los operadores de equipos, mediante la operación remota. Si bien el riesgo es algo menor, por contar con la protección que le brinda la cabina del equipo, alejar al operador de los taludes favorecería a reducir aún más la probabilidad de un accidente, y también puede implicar mejoras en productividad.



*Ilustración 27. Sistema de operación remota BENCH REMOTE, Atlas Copco.*

En la Ilustración 27 se presenta un ejemplo de esto, el sistema de operación remota *Bench Remote*, de Atlas Copco, el cual es compatible con la flota con que cuenta División Radomiro Tomic. Además de permitir retirar al operador de las zonas de mayor exposición, permite que un mismo operario pueda controlar hasta tres perforadoras de forma simultánea, mejorando la productividad del trabajador.

## 9. CONCLUSIONES

La primera y principal conclusión es que se recomienda fuertemente la implementación de la solución tecnológica presentada en este trabajo, que va en línea con las prioridades de la División Radomiro Tomic y la Corporación en términos de gestión de seguridad, así como con la nueva forma de hacer minería, tendiente a la automatización y retiro de los trabajadores de la exposición al riesgo. En definitiva, esta iniciativa es un paso más para vivir la minería del futuro hoy, donde las tecnologías de la información son puestas al servicio de las personas para hacer más eficientes los procesos, y a la vez reducir los riesgos asociados al ciclo productivo.

Es importante relevar que el integrar desde la conceptualización de la iniciativa a las diferentes áreas de la División involucradas fue clave para el desarrollo del presente trabajo. Esto permitió incorporar consideraciones de corte técnico/operativo no visualizadas en un inicio por el autor, haciendo de la implementación propuesta una solución mucho más robusta y completa, que considera en su diseño complementar el sistema de posicionamiento satelital con mediciones topográficas robóticas en terreno. Esta interacción, también permitió contar con un programa de implementación y pilotaje realista y exigente a la vez.

Si bien tempranamente se identificaron dos tipos de demarcación topográfica física (estacas) que hoy se utilizan en Radomiro Tomic, y que es relevante poder eliminar y reemplazar por demarcaciones virtuales, el análisis del alcance de la solución requerida determinó que la mejor opción es centrar los esfuerzos en la implementación de demarcaciones virtuales para perforación de control pared (*buffer* y precorte), que se enmarca en el contexto de la Transformación Digital, para luego, habiendo validado la implementación y evidenciado los beneficios obtenidos, ahondar en otros tipos de demarcación que requieren desarrollos de otro nivel, y que por ello demandan la intervención de más actores a nivel corporativo.

La evaluación económica realizada buscó analizar costos y beneficios cuantitativos de implementar esta solución. El análisis de costos se realizó en base a una cotización real de un proveedor de tecnología que hoy opera en Radomiro Tomic, lo que permite tener una alta certidumbre en los datos y a la vez la seguridad técnica de la solución, validada en primera instancia por la Gerencia Mina como área usuaria del sistema. Los beneficios se estimaron como la suma de los ahorros directos por implementar esta solución, junto con los beneficios obtenidos por el aumento de productividad fruto de la implementación. El análisis económico se realizó con una tasa de descuento del 8%, e indica que el proyecto genera un  $\Delta$ VAN de 564 KUSD a cinco años, y 153 KUSD a tres años. Esta evaluación económica, tanto por los beneficios estimados producto del aumento de productividad, como por los costos ingresados al flujo de caja, se considera conservadora, lo que implica un potencial económico superior. Por otro lado, si se incorpora a la evaluación el impacto de sufrir un accidente grave o fatal, se refuerza aún más la necesidad de llevar adelante la implementación de un sistema de demarcaciones virtuales que permita eliminar la actividad de demarcación física, ya que se estiman pérdidas aproximadas en torno a 5 millones de dólares por cada día de detención que implique sufrir un accidente grave o fatal producto de las actividades de demarcación que hoy se realizan; monto muy superior a los costos de implementación de un proyecto como el presentado, y que podría evitarse eliminando dichas actividades al contar con un sistema de demarcación virtual.

Luego, una vez validada la viabilidad económica del proyecto, es relevante seguir la secuencia propuesta para el éxito del mismo, con un primer énfasis en la prueba piloto, cuya pronta

realización se recomienda firmemente, especialmente considerando la habitual resistencia al cambio propia de la industria minera. Esta prueba, de desarrollarse con una perforadora, tendría un costo de 26 KUSD, monto razonable para evaluar una alternativa con el potencial impacto que tiene el presente proyecto. Luego, habiendo validado este pilotaje o prueba industrial, se gestionaría la implementación del sistema en la flota completa de perforadoras de control pared, con un programa que considera un periodo de adecuación de equipos y entorno, y luego una puesta en marcha con la incorporación gradual de las perforadoras al sistema. En la etapa de implementación, al igual que en las instancias anteriores, es relevante involucrar a los principales *stakeholders* en todo el proceso. Sin embargo, en esta etapa, el foco debe volcarse hacia los operadores, quienes en su mayoría llevan varios años realizando la actividad de la misma forma, y por otro lado son representados por sindicatos fuertes dentro de la organización, por lo que no tener éxito en la aceptación de la iniciativa por parte de ellos, podría significar el fracaso del proyecto.

Como toda iniciativa transformadora, existen riesgos asociados que son propios de la ruta que se debe sortear para avanzar hacia una minería moderna. Por lo mismo, para minimizar los riesgos técnicos de esta transformación digital, los ajustes administrativos (reducción de servicios y/o personal) no se deben realizar hasta haber concluido de forma satisfactoria la etapa de puesta en marcha. Otro riesgo relevante de este proyecto guarda relación con el control que la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo hoy ejerce sobre la operación, en que una herramienta de gestión son precisamente las demarcaciones físicas en terreno. Al reemplazarse este sistema por referencias virtuales se perdería esa forma de control, por lo que deben generarse protocolos de entrega de mallas de perforación adecuados. Estos protocolos deben ser comunicados y difundidos de forma efectiva, para asegurar mantener la disciplina operacional lograda en el esquema de trabajo actual.

Finalmente, se reitera la necesidad de dar curso a esta iniciativa cuanto antes, la que trae claros beneficios en ejes centrales del negocio minero, como es la seguridad, la productividad y el control de costos. Sin embargo, se sugiere hacerlo de acuerdo al programa de implementación propuesto, y seguir las recomendaciones señaladas en este informe, de modo de minimizar los riesgos y así asegurar el éxito de esta iniciativa de transformación digital, que además de los beneficios ya mencionados, contribuirá a seguir empujando a División Radomiro Tomic en la dirección de la minería del futuro, más competitiva y segura, requisito fundamental para poder concretar los objetivos de largo plazo de la División.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. ROBERT S. PINDYCK y DANIEL L. RUBINFELD. 2013. Microeconomía. 8va ed. Madrid, Pearson.
2. RICHARD A. BREALY, STEWART C. MYERS y FRANKLIN ALLEN. 2014. Principios de Finanzas Corporativas. 11va ed. México, McGraw-Hill.
3. DELOITTE. 2017. Tracking the trends 2017. Top issues for mining companies.
4. JOHN P. KOTTER. 1996. Leading Change. Harvard Bussiness School Press.
5. FUNDACIÓN CHILE. 2016. Desde el cobre a la innovación: Roadmap Tecnológico 2015-2035. [en línea]. Santiago, Chile. < <https://fch.cl/recurso/corporativo/roadmap/>> [Consulta: Febrero 2018]
6. MINERIA CHILENA. 2017. CodelcoTech: Con la tarea de agregar valor. [en línea]. Santiago, Chile. 13 septiembre, 2017. < <http://www.mch.cl/reportajes/codelco-tech-la-tarea-agregar-valor/#>> [Consulta: Enero 2018]
7. COMISIÓN NACIONAL DE PRODUCTIVIDAD. 2017. Productividad en la Gran Minería del Cobre. [en línea]. Santiago, Chile. < <http://www.comisiondeproductividad.cl/wp-content/uploads/2017/06/Informe-Final-Productividad-en-la-Gran-Mineria-del-Cobre-2.pdf>> [Consulta: Marzo 2018]
8. OHSAS 18.001:2007. Sistema de Gestión en Seguridad y Salud Ocupacional.
9. ISO 9001:2015, Sistemas de Gestión de la Calidad – Requisitos.
10. IVÁN BRAGA y JUAN VELÁZQUEZ. 2007. Material Curso Tecnologías de la Información. MBA Industria Minera, Universidad de Chile.
11. SEBASTIÁN CARMONA. 2017. Material Curso Gestión de Proyectos Mineros e Innovación. MBA Industria Minera Universidad de Chile.
12. EXSENS. 2015. Realidad Aumentada. [Diapositivas]. Chile.
13. CODELCO DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC. 2015. Gestión Integrada de Operaciones (GIO), Una reflexión al interior de RT. [Diapositivas]. Chile.
14. AMTC. 2016. Propuesta Técnica: Sistema para demarcación de bancos sin exposición de personas al talud. Universidad de Chile.
15. ATLAS COPCO. Catálogo de Equipo SMARTROC D65.
16. FINNING. Catálogo de Sistema Terrain.

17. CODELCO. 2011. Carta de Valores. [en línea]. Chile. <  
[https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/artic/20110225/asocfile/20110225165207/carta\\_de\\_valores\\_codelco.pdf](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110225/asocfile/20110225165207/carta_de_valores_codelco.pdf)> [Consulta: Agosto 2017]
18. CODELCO. 2016. Memoria Anual. [en línea]. Chile. <  
<https://www.codelco.com/memoria2016/pdf/memoria-anual/memoria-anual-codelco-2016.pdf>> [Consulta: Agosto 2017]
19. CODELCO. 2015. SGR-P-012 Procedimiento para la Gestión de Pérdidas. Chile.
20. CODELCO DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC. 2013. Instructivo Marcación Topográfica. Chile.
21. JIGSAW TECHNOLOGIES. 2018. Cotización MCC 001/2018 Demo iCon iRD3\_TPS. Chile.
22. JIGSAW TECHNOLOGIES. 2018. Cotización MCC 002/2018 iCon iRD3\_TPS.

# 11. ANEXOS

## Anexo A Matriz de Cambio/No cambio

		CAMBIO	NO CAMBIO
OPERADORES	(+) VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor Productividad</li> <li>• Aumento de capacidad laboral</li> <li>• Más seguridad - menos accidentes</li> <li>• No necesita Alarifes</li> <li>• Mayor Capacitación</li> <li>• Crecimiento como Trabajador/Persona</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantiene conocimiento del proceso</li> <li>• Mantener el status quo</li> <li>• No compete con otros</li> </ul>
	(-) DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrés por Nuevo Procedimiento</li> <li>• Requiere Tiempo de Implementación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de Competitividad</li> <li>• Obsolescencia Tecnológica</li> <li>• Riesgo de Accidentes</li> <li>• Menor Seguridad</li> <li>• Proceso conocido.</li> <li>• No hay riesgo de resistencia de los operadores</li> </ul>
SUPERVISIÓN GERENCIA MINA	(+) VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor Productividad</li> <li>• Más seguridad - menos accidentes</li> <li>• Mayor Autonomía (no depende de topógrafos)</li> <li>• Mayor eficiencia en el uso de recursos/equipos</li> <li>• Se eliminan tiempos de espera de marcas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgo de Accidentes. Menor seguridad</li> <li>• Pérdida de Competitividad</li> <li>• Obsolescencia Tecnológica</li> <li>• Se mantienen ineficiencias producto de espera de marcas</li> <li>• Mantiene Conocimiento del Proceso</li> <li>• No aumentan los costos conocidos</li> </ul>
	(-) DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe gestionar nuevo procedimiento. Puede haber resistencia de operadores</li> <li>• Requiere Tiempo de Implementación, probables fallas en el comienzo del proceso</li> </ul>	
CONTRATISTA TOPOGRAFÍA	(+) VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor Productividad</li> <li>• Más seguridad - menos accidentes</li> <li>• Disminuye errores de localización</li> <li>• Aumenta Precisión del Trabajo</li> <li>• Menos gastos en número de trabajadores</li> </ul>	
	(-) DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminuye Ganancia por Número de Trabajadores</li> <li>• Tiempo requerido para adaptar el cambio</li> <li>• Debe Capacitar a su grupo de trabajadores para nuevas tareas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de Competitividad</li> <li>• Obsolescencia Tecnológica</li> </ul>
EJECTIVOS	(+) VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más seguridad - menos accidentes</li> <li>• Mayor Productividad</li> <li>• Menores costos</li> <li>• Menor dotación</li> <li>• Posicionamiento innovador. Compañía pionera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso conocido</li> <li>• No requiere cambios administrativos</li> <li>• No requiere inversión inicial</li> </ul>
	(-) DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe administrar el cambio por nuevo procedimiento</li> <li>• Requiere recursos y tiempo de Implementación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgo de Accidentes. Menor seguridad</li> <li>• Pérdida de Competitividad</li> <li>• Obsolescencia Tecnológica</li> <li>• Mayores dotaciones</li> <li>• Mayor Gasto en Servicios de Terceros</li> </ul>